



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

KIINTEISTÖN YLIJÄNNITE- SUOJAUKSEN MALLI

TEKIJÄ: Eetu Harjunen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä Eetu Harjunen			
Työn nimi Kiinteistön ylijännitesuojauksen malli			
Päiväys	28.5.2018	Sivumäärä/Liitteet	38/6
Ohjaajat Yliopettaja Juhani Rouvali (Savonia), lehtori Heikki Laininen (Savonia)			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani SAVONIA-AMK OY			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli laatia ja tuottaa oppilaitokselle laboratoriotyöksi soveltuva ratkaisu ylijännitesuojien testaukseen. Sen avulla tulevat opiskelijat kykenevät havaitsemaan, mitä ylijännitesuojissa tapahtuu, kun suojat heräävät ukkosen aiheuttamaan ylijännitteeseen.</p> <p>Opinnäytetyö koostui laboratoriotyön järjestelyjen suunnittelusta ja toteutuksesta sekä opetuksen tukena käytettävän materiaalin laatimisesta. Työssä perehdyttiin kiinteistön ylijännitesuojaukseen ukkosen aiheuttamia ylijännitteitä vastaan. Työssä sivuttiin myös ylijännitesuojien testausta.</p> <p>Laboratoriotyössä mitataan kahden suojan jälkeistä jännitettä ja virtaa. Laboratoriotyön tarkoitus on havainnollistaa opiskelijoille, mitä ylijännitesuojissa tapahtuu, kun ukkosen aiheuttama ylijännitepulssi saavuttaa suojan ja suoja reagoi siihen. Suojien toiminta todetaan mittauksilla.</p> <p>Työn lopputuloksena oli laboratoriotyö ja siihen liittyvä työohje. Lisäksi työn ohessa syntyi Powerpoint -esitys, jossa perehdytään ylijännitesuojaukseen ja sivutaan testauksia. Powerpointia voidaan käyttää opetuksen tukena ja lisämateriaalina.</p>			
Avainsanat Ylijännitesuojaus, Syöksyjännitegeneraattori, Ylijännitesuojat, Ylijännite			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author Eetu Harjunen			
Title of Thesis Model of Overvoltage Protection System			
Date	28 May 2018	Pages/Appendices	38/6
Supervisors Mr Juhani Rouvali, Principal Lecturer (Savonia), Mr Heikki Laininen, Senior Lecturer (Savonia)			
Client Organisation /Partners Savonia University of applied sciences			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to plan and produce a laboratory exercise to be used at Savonia University of Applied Sciences. The purpose of the laboratory exercise is teach, what will happen in overvoltage protection devices, when the overvoltage pulse reaches overvoltage protection devices.</p> <p>This thesis consisted of the planning and the implementation of laboratory exercise arrangements. Also a PowerPoint presentation about the overvoltage protection and the testing of overvoltage protection devices was made. This thesis focused on overvoltage protection in buildings against overvoltages caused by thunder and lightning strikes. This thesis also touched on testing of overvoltage protection devices.</p> <p>The laboratory exercise measures the voltage and current after two overvoltage protection devices. The purpose of the laboratory exercise is to demonstrate what happens in overvoltage protection devices when the overvoltage pulse caused by thunder reaches protection devices and how protection devices react to it. Operations of overvoltage protection devices are verified by measurements.</p> <p>The results of this thesis were the laboratory exercise and a procedure manual of laboratory exercises. Also a PowerPoint presentation about overvoltage protection and the testing of overvoltage protection devices was made. The presentation can be used as support material in education.</p>			
<p>Keywords</p> <p>Overvoltage protection, impulse generator, overvoltage protection devices, Overvoltage,</p>			

ESIPUHE

Oppilaitoksen tarve ylijännitesuojausta koskevalle opetusratkaisulle oli pohja tälle opinnäytetyölle. Kiinnostuin työstä, kun kevään 2017 aikana suoritettulla Projekti 3 -kurssilla tehtäväksi annetun kiinteistön ylijännitesuojauksen mallin kehitystyö tyssäsi jännitelähdeongelmaan ja opettaja, Juhani Rouvali, mainitsi mahdollisuudesta jatkaa kehitystä opinnäytetyönä. Tuotoksen vaillinaisuus jäi harmittamaan itseäni, enkä voinut vastustaa kiusausta syöksyä projektin kimppuun uudestaan, kun siihen annettiin mahdollisuus.

Savonia on tarjonnut hyvät puitteet opinnäytetyölleni. Työn vaatimat laitteistohankinnat saatiin tehtyä hyvässä yhteisymmärryksessä ja tarvittaessa sain tukea ja hyödyllisiä neuvoja työn suorittamiseen. Olen iloinen, että voin olla osana kehittämässä Savonian opetusta ikään kuin kiitoksena Savonian minulle tarjoamasta opetuksesta.

Näin lopuksi haluan kiittää vanhempiani kaikesta tuesta ja kannustuksesta. Isääni kiitän erityisesti, sillä häneltä sain kipinän opiskella sähkötekniikkaa. Lisäksi haluan kiittää ohjaajaani yliopettaja Juhani Rouvalia ja laboratorioinsinööri Henrik Sikasta tuesta ja hyödyllisistä neuvoista.

Kuopiossa 28.5.2018

Eetu Harjunen

SISÄLTÖ

ESIPUHE	4
1 JOHDANTO	6
1.1 Lyhenteet ja määritelmät	6
2 UKKOSEN AIHEUTTAMAT YLIJÄNNITTEET	7
2.1 Ukkosen syntymekanismit	7
2.2 Ukkosylijännitteiden siirtyminen sähköverkkoon	8
2.2.1 Suora salaman isku jännitteeseen vaihejohtimeen	8
2.2.2 Induktio	9
2.2.3 Takaisku	9
3 SYÖKSYJÄNNITEGENERAATTORI	10
3.1 Yleistä	10
3.2 Marxin generaattorin soveltaminen työssä	11
4 YLIJÄNNITESUOJAUS KIIINTEISTÖISSÄ YLEISESTI	15
4.1 Ylijännitesuojauksen pakollisuuteen vaikuttavat asiat	15
4.2 Ylijännitesuojaus	16
4.3 Kiinteistön salamasuojaus	18
5 YLIJÄNNITESUOJAUKSEN MALLI	19
5.1 Työn taustat	19
5.2 Yleiskuvaus	19
5.3 Rakentaminen	20
5.4 Testaus	20
5.4.1 Mittalaitteisto ja tulosten tulkinnalliset seikat	20
5.4.2 Alkuperäisen suunnitelman mukaan tehdyt testaukset	20
5.4.3 Lähes standardimuotoisella pulssilla suoritettut testit	23
5.5 Laboratoriotyön yleisjärjestely	28
6 YHTEENVETO JA POHDINTA	31
7 LÄHDELUETTELO	32
8 LIITTEET	33
LIITE 1 LABORATORIOTYÖN TYÖOHJE	33

1 JOHDANTO

Ukkonen on tärkein jakeluverkon ylijänniteiden aiheuttaja. Myös kytkentätilanteet, vikatilanteet ja yliaallot (resonanssitilanteet) voivat aiheuttaa ylijännitteitä. Tässä työssä keskitytään ainoastaan ukkosen aiheuttamiin ylijännitteisiin ja niiltä suojautumiseen.

Ylijännitteet ovat haitallisia etenkin paljon elektroniikkaa sisältäville laitteille. Ylijännitteet voivat aiheuttaa laitteiden vikaantumisia komponenttivaurioiden johdosta ja vaaratilanteita ihmisille laitteen eristyksen pettäessä suuren jänniterasituksen vaikutuksesta. Näistä syistä ylijännitteiltä kannattaa suojautua. Ylijännitesuojaus on nykyään yleistynyt kiinteistöjen sähköverkoissa. Yksi osatekijä ylijännitesuojauksen yleistymiseen on standardit, joissa veloitetaan ylijännitesuojaus määrätyissä olosuhteissa ja tapauksissa. Toinen osatekijä on kiinteistöihin ja koteihin hankittujen elektronisten laitteiden ja tietoteknisten järjestelmien määrä, sillä ne ovat alttiita ylijännitteille. Tällaisten laitteiden ja järjestelmien vikaantumisesta aiheutuu vähintäänkin taloudellisia vahinkoja. Näin ollen tavalliset kuluttajat asennuttavat ylijännitesuojia mielellään seillaisiinkin kohteisiin, joihin standardien näkökulmasta ei veloiteta ylijännitesuojauksia.

Tämän työn tarkoituksena on perehtyä kiinteistön ylijännitesuojaukseen ukkosen aiheuttamia ylijännitteitä vastaan. Lisäksi työssä sivutaan ylijännitesuojauksen standardeja ja ylijännitesuojien testausta.

Työn tavoitteena on luoda oppilaitoksen käyttöön järjestelmä, jonka avulla ylijännitesuojien toimintaa voidaan tarkastella laboratoriotyön muodossa. Työn lopullisena tavoitteena on tuottaa laitteistokokonaisuus, jolla kiinteistön ylijännitesuojien toimintaa voidaan havainnollistaa oskilloskoopilla mittaamalla. Testausta varten laaditaan laboratoriotyön työohje sekä opetuskäyttöön soveltuva materiaali, jossa perehdytään ylijännitesuojaukseen.

1.1 Lyhenteet ja määritelmät

LEMP	Lightning electromagnetic pulse, Salaman aiheuttama elektromagneettinen pulssi
C _{RL}	Calculated risk level, Laskemalla todettu riskitaso
T1	Karkea- eli ukkossuoja
T2	Keskisuoja (kytkentäylijännitteitä vastaan)
T1+T2	Yhdistelmäsuoja, jossa samassa suojassa yhdistyy sekä T1 että T2 suojien ominaisuudet
T3	Laite- eli hienosuoja

2 UKKOSEN AIHEUTTAMAT YLIJÄNNITTEET

2.1 Ukkosen syntymekanismit

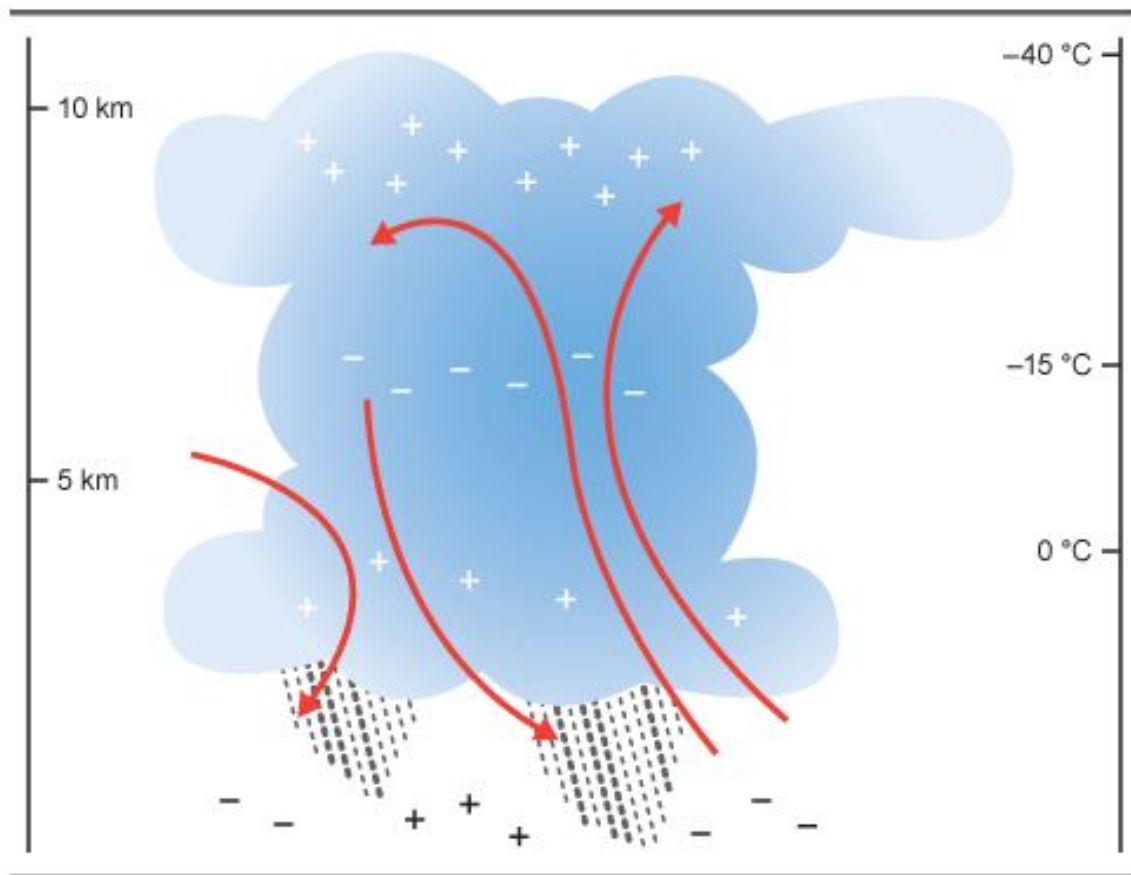
Suomessa esiintyvien ukkosten syntytavat voidaan jaotella karkeasti kahteen eri luokkaan. Syntyvät ovat rintamaukkonen ja ilmamassaukkonen, mutta osassa syntyneissä ukkosissa on piirteitä molemmista synty tavoista. Ilmamassaukkosta kutsutaan myös synty tapansa perusteella lämpö-ukkoseksi. Ainut ero synty tapojen välillä on siinä, kuinka ilman tasapainotilanne muuttuu lopulta epävakaaksi.

Rintamaukkonen syntyy, kun kylmä ja lämmin rintama kohtaavat. Rintamaukkonen syntyy herkemmin kylmään rintamaan, koska kylmä ilma on tiheämpää ja raskaampaa kuin lämmin ilma, sen on helpompi päästä ja kiilautua lämpimän ilmamassa alle, jolloin lämmin ja kostea ilma rupeaa kohoaamaan.

Ilmamassa- eli lämpöukkonen puolestaan syntyy, kun aurinko lämmittää voimakkaasti maan pintaa ja vesistöjä. Maasta ja vesistöistä kohonnut vesihöyry nostaa ilmankosteutta. Kohonnut ilmankosteus saa aikaan sen, että alkaa muodostua runsaasti kumpupilviä, jotka jatkavat korkeuden kasvua ja muuttuvat jossain vaiheessa kuuro- ja ukkospilviksi. Suomessa lämpöukkokosta esiintyy lähes ainoastaan kesäisin ja silloinkin etupäässä iltapäivisin. Näin ollen puhtaita lämpöukkosia esiintyy Suomessa melko vähän.

Synty tavasta riippumatta ukkospilvien sähköiset varaukset muodostuvat samalla tavalla. Tietyllä korkeudella ilmassa oleva kosteus tiivistyy pilveksi, jolloin vapautuu energiaa. Tiivistymisessä vapautunut energia voimistaa jo olemassa olevia nousuvirtauksia, joita syntyy, kun ilman lämpötilan pystyjakama on tarpeeksi epästabili. Nousuvirtauksien ansiosta pilvi kasvaa korkeutta ja tietyssä pisteessä pilvi saavuttaa korkeuden, jossa muodostuu huurtamalla kasvavia, nousuvirtauksen kannattelemia lumirakeita. Pilven sisällä vallitseva nousuvirtaus kuljettaa pilven alaosaan pieniä jääkiteitä ylös pilven ylempiin kerroksiin. Jääkiteet ja lumirakeet törmäilevät toisiinsa jääkiteiden matkan aikana, jolloin molemmat saavat vastakkaismerkkiset sähköiset varaukset. Kevyemmät jääkiteet nousevat aivan pilven yläosiin ja saavat positiivisen varauksen. Jääkiteitä painavimmat lumirakeet jäävät pilven keskivaiheille ja saavat negatiivisen varauksen. Ukkospilven varausten jakautuminen pilven sisällä on esitetty tarkemmin kuvassa 1.

Salama syntyy, kun pilven varauskeskusten välinen potentiaali tasautuu ilman läpilyöntilujuuden pettäessä. Tällöin kyseessä on pilvisalama. Maasalama syntyy, kun toisen varauskeskuksen ja maan välinen potentiaaliero tasautuu varauskeskuksen ja maan välisen ilman läpilyöntilujuuden pettäessä. Ennen varsinaista salamaa maahan etenee niin sanottu esisalama, joka avaa purkaukskanavan varsinaiselle salamalle. Ukkosen jyrähdys aiheutuu, kun salama lämmittää ilman ympärillään korkeaan lämpötilaan hyvin nopeasti. Lämmennyt ilma laajenee räjähdysmäisesti, josta aiheutuu kova pamahdus, joka etäämpää kuuluu jyrinänä. (Ilmatieteen laitos, 2018)



Kuva 1. Ukkospilven varausten jakautuminen (Ilmatieteen laitos, 2018)

2.2 Ukkosylijännitteiden siirtyminen sähköverkkoon

Ukkosen aiheuttamat ylijännitteet voivat siirtyä sähköverkkoon kolmella eri tavalla. Siirtymistavat ovat suora salaman isku jännitteiseen johtoon tai johtimeen, induktion kautta tapahtuva siirtyminen ja salaman isku maadoitettuun osaan ja siitä johtuva takaisku.

2.2.1 Suora salaman isku jännitteiseen vaihejohtimeen

Suora salaman isku jännitteiseen johtimeen on todellinen riski, kun sähköverkkoa on rakennettu avojohdoilla. Riskiä on pyritty pienentämään käyttämällä avojohdoilla ukkosköysiä, mutta ukkosköysistä huolimatta salama sattaa iskeä avojohdtoon.

Salaman iskiessä suoraan avojohdon vaihejohtimeen, syntyy johdon suuntaisesti eri suuntiin eteneviä kulkuaaltoja. Kulkuaallon tuoma ylijännitteen suuruus on puolet johdon aaltoimpedanssin ja salaman virran tulosta. Vaihejohtimeen osuneen suoran salaman iskun aiheuttama ylijännitteen suuruus on esitetty kaavassa 1, jossa u on ylijänniteaallon suuruus, Z_w on johdon aaltoimpedanssi ja i on salaman virta

$$u = \frac{1}{2} \cdot Z_w \cdot i. \quad (1)$$

Tavallisesti avojohtojen aaltoimpedanssit ovat luokkaa 250 Ω – 500 Ω, jolloin salaman iskun aiheuttamat ylijännitteet ovat suuruudeltaan useimmiten useita megavoltteja. Avojohtoa pitkin etenevä ylijännitteallion suuruuteen kuitenkin vaikuttaa pienentävästi johdon jännitelujuus ja ylijännitteallion jyrkkyyteen puolestaan vaikuttaa salamavirran jyrkkyys ja avojohdon korona-ilmiö sekä johtimissa ja maadoituksissa tapahtuvat häviöt. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2003, s. 285)

2.2.2 Induktio

Salaman isku voi synnyttää ylijännitteitä sähkömagneettisen induktion kautta, mikäli salama iskee sähkölaitteen tai -johdon välittömään läheisyyteen. Salaman indusoima ylijännite ei noudata induktion tavanomaisia lainalaisuuksia, sillä yleensä salama ja johto, johon ylijännite indusoituu, ovat liki kohtisuorassa toisiinsa nähden. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2003, ss. 292-293)

2.2.3 Takaisku

Takaisku voi aiheutua sähköjakelu verkon puolella tai kiinteistön lähellä olevien korkeiden kohteiden, kuten puiden vaikutuksesta. Jakeluverkon puolella tapahtunut takaisku saa alkunsa, kun salama iskee avojohdolla pylvään maadoitettuihin osiin. kaikki osat, jotka ovat johtavassa yhteydessä salaman iskukohtaan ovat rinnankytkennässä salamaviralle, jolloin salamavirta haarautuu kyseisissä kohdissa kääntäen verrannollisesti aaltoimpedanssien suhteen. Salamavirta kulkee edellä mainittuja reittäjä pitkin edestakaisin, jonka jälkeen pylvään tyvestä palaa heijastunut aalto, johon vaikuttaa pylvään tyven ja maadoitusjohdinten yhteisten aaltoimpedanssien rinnankytkentä. Mikäli salamavirta aiheuttaa pylvään resaltoivassa aaltoimpedanssissa jännitteen, jonka suuruus ylittää vaihejohtimen ja maadoitetun osan välisen jännitelujuuden, tapahtuu ylilyönti. Tapahtumasta ja siitä aiheutuneesta ylijänniteaallostaa käytetään nimitystä takaisku, sen takaperoisen syntytyvan mukaan. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2003, ss. 285-286)

Takaisku voi sattua myös kiinteistön lähellä olevan puun tai lipputangon kautta. Maaperä ollessa huonosti johtavaa, puun tai lipputangon tyven potentiaali nousee korkeaksi ja potentiaalin purkautuminen tapahtuu maavalokaaren muodossa. Mikäli maavalokaaren tielle sattuu rakennukseen johtava laaja metalliosa, kuten metallinen putki, joka on yhteydessä maadoitukseen, maavalokaari saattaa aiheuttaa rakennuksen sisäiseen sähköverkkoon takaiskun. Sekä jakeluverkossa että kiinteistön sisällä tapahtuvassa takaiskussa yhteisiä tekijöitä takaiskun synnylle ovat maan huono sähkön johtavuus ja korkea salamavirta. Hyvin johtavassa maassa takaiskun todennäköisyys on huomattavasti pienempi suurillakin salamavirroilla verrattuna huonosti johtavaan maahan. (TUKES)

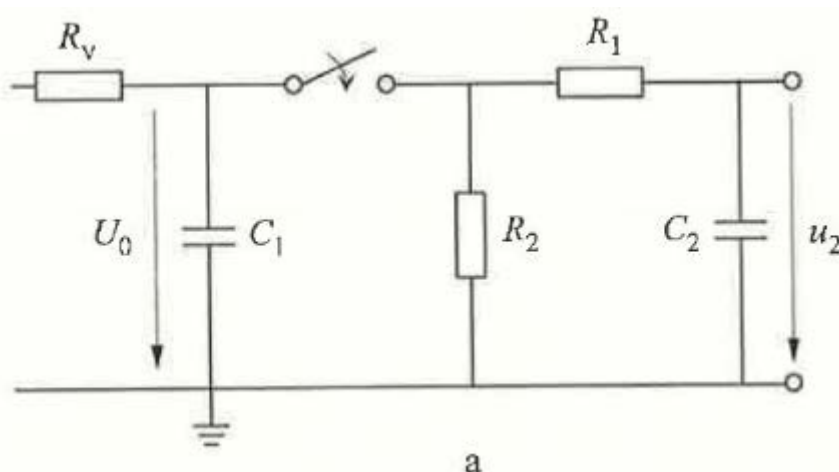
3 SYÖKSYJÄNNITEGENERAAATTORI

Syöksyjännitegeneraattori on olennainen osa työtä, sillä syöksyjännitegeneraattorilla on mahdollista luoda kohtuullisen tarkasti ukkosta matkiva pulssi. Koska työ keskittyy ylijännitesuojaukseen ukkosta vastaan, syöksyjännitegeneraattorilla luotu ukkospulssi on kyseiseen tarkoitukseen kaikkein sopivin keinotekoinen ylijännitelähde.

3.1 Yleistä

Työssä käytettävänä syöksyjännitegeneraattorina toimii myös Marxin generaattorinakin tunnettu Marxin kytkentä. Marxin generaattorin periaatekuva on esitetty kuvassa 2. Marxin generaattoriksi kutsutun kytkennän kuvaili ensimmäisenä saksalainen Erwin Otto Marx vuonna 1923. Marxin generaattorilla saadaan aikaan aikaan pienelläkin latausjännitteellä suuria jännitepulsseja.

(Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2003, s. 373)



Kuva 2 Marxin generaattorin periaatekuva. (Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2003, s. 373)

Marxin generaattorilla ukkosta matkiva pulssi saadaan aikaan lataamalla kondensaattori C_1 tasajännitteellä arvoon U_0 . Systeemissä kytkimenä toimii pallokipinäväli, joka suljetaan nostamalla jännitettä niin ylös, että pallojen välisen ilman läpilyöntilujuus pettää. Työssä on käytettävissä moottorilla säädettävä pallokipinäväli, joten systeemillä voitiin tehdä pulsseja, joiden pienin arvo oli 10 kV. Tämän jälkeen kondensaattorin C_1 varaus jakaantuu sen itsensä ja kuormitus kapasitanssin C_2 kanssa keskenään nopeasti. Tätä vaihetta kutsutaan tasoitusvaiheeksi, jonka aikana jännite u_2 nousee piirin aikavakion osoittamalla tavalla. Tasoitus vaihetta seuraa purkausvaihe, jonka aikana piiriin latauksen aikana varastoitunut energia muuttuu lämpöenergiaksi virtapiirin vastuksissa.

(Aro;Elovaara;Karttunen;Nousiainen;& Palva, 2003, ss. 372-374)

Piirissä vaikuttaa kaksi aikavakiota. Aikavakio τ_1 määrittää syöksyjännitteen rinnan kestoaikaa ja τ_2 määrittää pulssin selän puoliarvonajan. Piirin aikavakiot lasketaan seuraavasti (kaavat 2 ja 3)

$$\tau_1 \approx R_1 \cdot (C_1 \cdot C_2) / (C_1 + C_2) \quad (2)$$

$$\tau_2 \approx R_2 \cdot (C_1 + C_2) \quad (3)$$

Aikavakioiden avulla voidaan laskea loppujännite u_2 kaavan 4 avulla.

$$u_2(t) = (U_0 / R_1 \cdot C_2) \cdot (\tau_1 \cdot \tau_2 / \tau_2 - \tau_1) \cdot (e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1}) \quad (4)$$

Aikavakioista voidaan laskea likimääräisesti rinnan kesto aika ja selän puoliarvonaika mikrosekunteina. Rinnan kestoajan laskenta noudattaa kaavaa 5 ja selän puoliarvonajan laskukaava on noudattaa yhtälöä 6

$$T_1 \approx \tau_1 \cdot 2,96 \quad (5)$$

$$T_2 \approx \tau_2 \cdot 0,73. \quad (6)$$

3.2 Marxin generaattorin soveltaminen työssä

Työssä käytettävässä Marxin generaattorissa käytössä olevien komponenttien arvot ja käytettävissä olevat kappalemäärät ovat seuraavat:

$$R_1 = 245 \, \Omega \text{ (2 kpl)}$$

$$R_2 = 2400 \, \Omega \text{ (2 kpl)}$$

$$C_1 = 25000 \, \text{pF} \text{ (3 kpl)}$$

$$C_2 = 1200 \, \text{pF} \text{ (2 kpl)}.$$

Työn edetessä selvisi, että alkuperäisen kytkennän tuottama pulssi on suojuille liian nopea. alkuperäisellä kytkennällä pulssin nousuaika on noin $0,83 \, \mu\text{s}$ ja puoliarvonaika on $45,9 \, \mu\text{s}$. Toisin sanoen pulssi on muotoa $0,83 / 45,9 \, \mu\text{s}$. IEC standardissa sanotaan, että kiinteistön ylijännitesuojien tulee kestää ja rajoittaa ukkospulssi, joka on muotoa $10 / 350 \, \mu\text{s}$. Tästä syystä pulssia jouduttiin muokkaamaan hitaamaksi aikavakioita muuttamalla. Aikavakioiden muuttaminen tapahtui fyysisiä komponenttien arvoja muuttamalla. Koska käytössä oli rajallinen määrä vakioarvoisia komponentteja, komponenttien arvojen muuttaminen toteutettiin sopivilla rinnan- ja sarjaankytkennöillä. Näin ollen täysin IEC standardin vaatimukset täyttävän pulssin saavuttaminen oli mahdotonta.

Aluksi laskennallisesti selvitetiin, kuinka suuria kapasitanssien pitäisi olla tietyllä vastusarvolla, kun tavoitteena oli 10 / 350 μ s muotoinen pulssi. Laskentatuloksista selvisi, että käytössä olevilla kondensaattoreilla standardimuotoinen pulssi ei ole mahdollinen, sillä kapasitanssi olisi niin suuri, että rinnankytkennän toteuttamiseen vaadittavien kondensaattorien määrä ylittäisi reilusti käytettävissä olevien kondensaattorien määrän eikä uusien kondensaattorien hankkiminen tullut kysymykseenkään.

Lopulta päädyttiin ratkaisuun, jossa selvitetiin, minkä muotoinen pulssi olisi mahdollista saada aikaan käytössä olevilla komponenteilla. Uudet komponenttiarvot laskettiin sijoittamalla kaavoihin 2 ja 3 resistanssien ja kapasitanssien arvoiksi sellaisia lukuarvoja, jotka pystytään toteuttamaan käytössä olevilla komponenttimäärillä joko rinnan- tai sarjaankytkettynä. Saaduista aikavakioista laskettiin kaavojen 5 ja 6 mukaisesti rinnan kesto aika ja selän puoliarvonaika. Selvitystyön päätteeksi tulokseksi saatiin uudet komponenttiarvot, joilla syöksyjännitegeneraattorin tuottama pulssi on huomattavasti lähempänä IEC standardissa määriteltyä pulssia. Uudet komponenttiarvot ovat seuraavat:

$$R_1 = 245 \, \Omega$$

$$R_2 = 4800 \, \Omega$$

$$C_1 = 50000 \, \text{pF}$$

$$C_2 = 25000 \, \text{pF}.$$

Komponenttien arvojen perusteella voidaan laskea Marxin generaattorin tuottama syöksyjännite ja piirin aikavakiot käyttäen apuna edellä esiteltyjä kaavoja. Kyseisillä komponenttien arvoilla aikavakiot ovat seuraavat:

$$\tau_1 \approx R_1 \cdot (C_1 \cdot C_2) / (C_1 + C_2) \approx 245 \, \Omega \cdot \frac{(50000 \, \text{pF} \cdot 25000 \, \text{pF})}{50000 \, \text{pF} + 25000 \, \text{pF}} \approx 4,083 \, \mu\text{s}$$

$$\tau_2 \approx R_2 \cdot (C_1 + C_2) \approx 4800 \, \Omega \cdot (50000 \, \text{pF} + 25000 \, \text{pF}) \approx 360 \, \mu\text{s}.$$

Nyt tiedossa on piirin aikavakiot, joiden avulla kyetään laskemaan syntyvän syöksyjännitepulssin suuruus. Koska käytettävissä olevan Marxin generaattorin tasajännitettä voidaan säätää, esimerkki laskussa on valittu tasajännitteen arvoksi 20 kV ja ajanhetkeksi $t = 12 \, \mu\text{s}$

$$\begin{aligned} u_2(t) &= (U_0 / R_1 \cdot C_2) \cdot (\tau_1 \cdot \tau_2 / \tau_2 - \tau_1) \cdot (e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1}) \\ &= \frac{20000 \, \text{V}}{245 \, \Omega \cdot 25000 \, \text{pF}} \cdot \frac{4,083 \, \mu\text{s} \cdot 360 \, \mu\text{s}}{360 \, \mu\text{s} - 4,083 \, \mu\text{s}} \cdot \left(e^{\frac{-12 \, \mu\text{s}}{360 \, \mu\text{s}}} - e^{\frac{-12 \, \mu\text{s}}{4,083 \, \mu\text{s}}} \right) = 12330,33 \, \text{V}. \end{aligned}$$

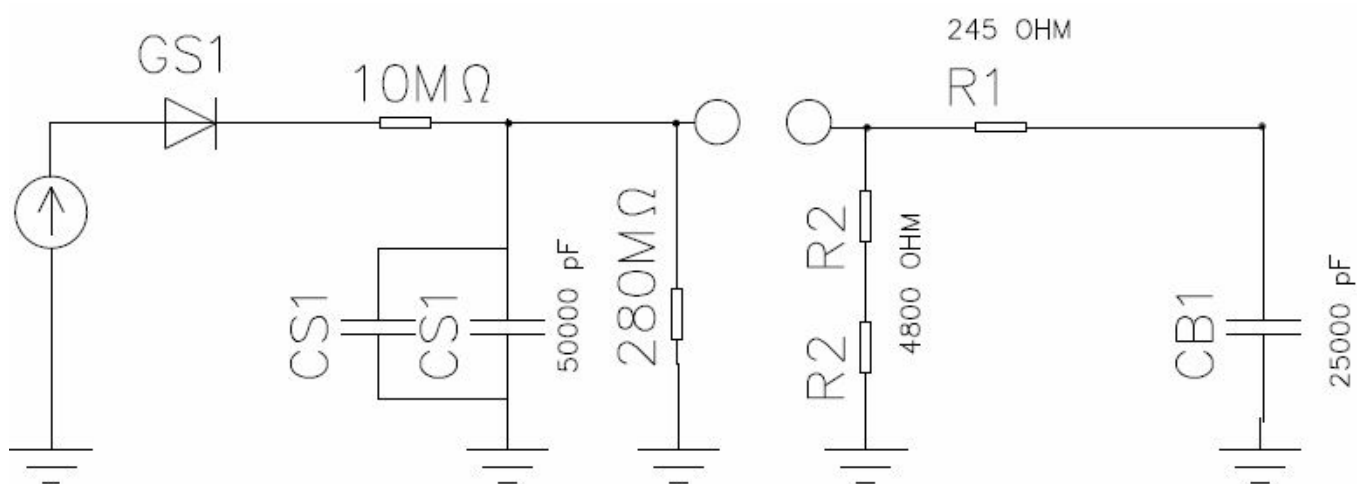
Pulssin rinnan kesto aika ja selän puoliarvonaika saadaan laskettua käyttäen kaavoja 5 ja 6. Uusilla komponenttiarvoilla rinnan kesto aika T_1 on

$$T_1 \approx \tau_1 \cdot 2,96 \approx 4,083 \mu s \cdot 2,96 \approx 12,083 \mu s.$$

Vastaavasti selän puoliarvonaika T_2 on

$$T_2 \approx \tau_2 \cdot 0,73 \approx 360 \mu s \cdot 0,73 \approx 262,8 \mu s.$$

Näin ollen pulssin muoto on 12 / 263 μs ja poikkeaa hieman ja parempaan suuntaan IEC standardissa esitetystä 10 / 350 μs muotoisesta pulssista. Edellä kuvatuista laskuista saadut komponenttiarvot toteutettiin kytkennällisesti kuvan 3 osoittamalla tavalla ja kuvassa 4 puolestaan on esitetty valmiiksi rakennettu Marxin generaattori.



Kuva 3 Marxin generaattorin kytkentäkuva uusilla komponenttiarvoilla.



Kuva 4. Työssä käytetty Marxin generaattori.

4 YLIJÄNNITESUOJAUS KIIINTEISTÖISSÄ YLEISESTI

4.1 Ylijännitesuojauksen pakollisuuteen vaikuttavat asiat

Suomessa ylijännitesuojaus on pakollista, mikäli riski on osoitettu laskennallisesti merkittäväksi. Laki velvoittaa ylijännitesuojauksen tiloissa, joissa käsitellään tai varastoidaan räjähdysvaarallisia aineita, vaikka riskiarvion perusteella sille ei olisi normaali kohteessa tarvetta. Lisäksi tietyille kohteille ylijännitesuojaukselle on vaatimuksia asetettu vaakuutusyhtiöiden tai viranomaisten puolelta. Muissa tapauksissa ylijännitesuojaus on vapaaehtoista. (TUKES), (Suomen Standardisoimisliitto ry, 2017)

Kohteet, joihin vakuutusyhtiöt tai viranomaiset vaativat ylijännitesuojausta, ovat kulttuurisesti merkittäviä kohteita, kuten museoita, kirjastoja, kirkkoja tai julkishallinnollisia rakennuksia. Tällaisissa kohteissa viranomaiset ja vakuutusyhtiöt perustelevat ylijännitesuojien pakollisuutta merkittävän kulttuuriperinnön ja tiedon suojaamisella ukkosen aiheuttamilta riskeiltä.

Riskitason määrittely laskennallisesti tapahtuu kaavan 7 mukaisesti. Kaavassa f_{env} on ympäristökerroin, jonka arvo saadaan Taulukon 1 mukaisesti kyseisessä tilanteessa. N_g puolestaan on sähköjohdon ja sähköverkkoon liitettävän rakenteen sijainnille ominainen salamaniskutiheys eli salaman iskuja neliökilometriä kohden vuodessa.

$$CRL = f_{env} / (L_p \cdot N_g). \quad (7)$$

Taulukko 1. Taulukko f_{env} kertoimen laskemiseen. (Suomen Standardisoimisliitto ry, 2017)

Ympäristö	f_{env}
Maaseutu ja taajamaympäristö	$85 \times F$
Kaupunkiympäristö	$850 \times F$

Taulukossa 1 esiintyvän kertoimen F arvo saadaan suojattavan rakennuksen tyypistä ja käyttötarkoituksesta. Mikäli kyseessä on yksittäinen asunto, vapaa-ajan asunto tai niihin liittyviä tiloja F :n arvo on silloin 3. Muissa tapauksissa käytetään F :n arvoa 1. Käytetyt kertoimen F arvot pätevät ainoastaan Suomessa ja ulkomailla käytetään arvoja, jotka saattavat poiketa paljonkin Suomessa käytettävistä arvoista, koska Suomessa ukkostaa vähemmän kuin esimerkiksi Keski-Euroopan maissa.

Kaavassa 7 esiintyvä L_p on yhdistetty johtopituus, johon on sisällytetty sekä suur-, että pienjännitteiset ilmajohdot ja maakaapelit. L_p lasketaan kaavan 8 avulla, jossa L_{PAL} on pienjänniteilmajohdon pituus, L_{PCL} on pienjännitemaakaapelien pituus, L_{PAH} suurjänniteilmajohdon pituus ja L_{PCH} suurjännitemaakaapelien pituus. Kaikki johtojen pituudet tulee syöttää laskuun kilometreinä

$$L_p = 2 \cdot L_{PAL} + L_{PCL} + 0,4 \cdot L_{PAH} + 0,2 \cdot L_{PCH}. \quad (8)$$

SFS 6000-4-44 standardissa sanotaan seuraavaa johtopituuksien laskemisesta:

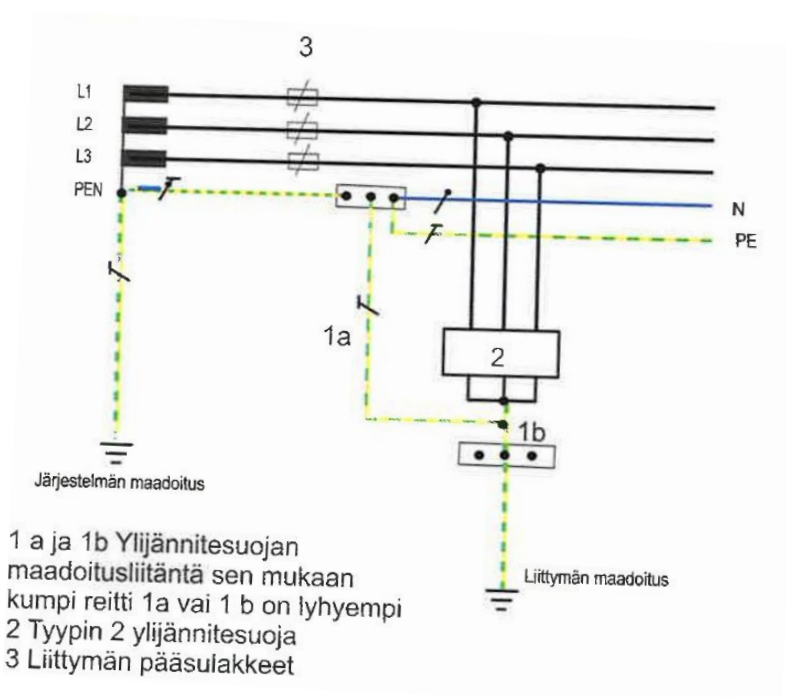
"Kokonaispituus ($LP = 2 LPAL + LPCL + 0,4 LPAH + 0,2 LPCH$) on rajoitettu etäisyyteen 1 km tai etäisyyteen ensimmäiseen jakeluverkkoon asennetusta ylijännitesuojasta asennuksen sisäänmenoon saakka sen mukaan kumpi on pienempi. Jos jakeluverkon pituudet ovat kokonaan tai osittain tuntemattomia, etäisyys $LPAL$ pitää valita yhtä suureksi kuin jäljellä oleva etäisyys, jolla saavutetaan 1 km kokonaispituus. Esimerkiksi, jos tiedetään vain maakaapelin pituus (esim. 100 m), silloin $LPAL$ arvoksi pitää ottaa 900 m." (Suomen Standardisoimisliitto ry, 2017)

Laskentatuloksena saadaan lukuarvo, jonka suuruus määrittää ukkossuojauksen pakollisen tarpeen. Mikäli saatu C_{RL} arvo on 1000 tai suurempi, ukkossuojausta ei tarvitse toteuttaa. C_{RL} arvon ollessa alle 1000, esimerkiksi 999, tulee ukkossuojaus toteuttaa asiaankuuluvilla ratkaisulla.

4.2 Ylijännitesuojaus

Toimivan ylijännitesuojauksen tärkein perusedellytys on toimiva ja yhtenäinen maadoitus. Ilman kunnollista maadoitusta ylijännitesuojaus ei toimi kunnolla tai ei lainkaan. Suojien maadoitusjohtimelle annetaan kaksi vaihtoehtoista reittiä standardissa SFS 6000-5-53. Suojajohtimen reitit on esitetty kuvassa 5. Suojajohtimen reitti riippuu siitä, kumpi on lyhyempi, mutta yleisesti suositellaan kytkettäväksi molemmat reitit, ellei reitti $a1$ ole hyvin lyhyt (< 20 cm). Mikäli johdin $a1$ jätetään kokonaan pois, seurauksena maadoitusjohtimessa kulkeva salamavirta joutuu kulkemaan pidemmän matkan, jolloin todennäköisyys muihin johtoihin ja johtimiin indusoituihin jännitteisiin kasvaa. (Sähköinfo Oy, 2017)

Ylijännitesuojauksen ensisijainen tarkoitus on rajoittaa ylijännitteet sellaiselle tasolle, jonka suojattavat laitteet kestävät eristyksensä ja komponenttiensa puolesta. Ylijännitesuojauksen tulee suojata sähkölaitteistoa kaikenlaisia ylijännitteitä vastaan, johtuvatpa ne ukkosesta, kytkentätilanteista tai yliaalloista. Näistä tavalliselle kuluttajalle kaikkein näkyvimpinä ovat ukkosen aiheittamat ylijännitteet.



Kuva 5. Maadoitusreitit ylijännitesuojille (Sähköinfo Oy, 2017, s. 164)

Ylijännitesuojaus toteutetaan kolmiportaaisena. Ensimmäisenä suojaportaana on karkea- eli ukkosuoja (T1), joka asennetaan kiinteistön pääkeskukseen ja mahdollisesti myös mittari- tai jakokeskukseen, mikäli kyseessä on laaja kiinteistö. Ukkossuojan tarkoitus on nimensä mukaisesti suojata kiinteistön sähköverkkoa ukkosen aiheuttamilta ylijännitteiltä.

Toisena suojaportaana on ns. keskisuoja (T2), jonka ensisijainen tehtävä on rajoittaa muista kuin ukkosesta johtuvat ylijännitteet siedettävälle tasolle. Toisen portaatan suojat asennetaan kiinteistön ryhmä- ja jakokeskuksiin. Pienissä kohteissa, kuten normaaleissa omakotitaloissa ensimmäisen ja toisen portaatan suojauksen voi toteuttaa yhdistelmäsuojalla (T1+T2), joka toimii samaan aikaan ukkossuojana ja keskisuojana.

Kolmantena ja viimeisenä portaana on laitesuoja eli niin sanottu hienosuoja (T3), jonka tehtävä on rajoittaa edellisistä suojaportaista mahdollisesti läpi tulleet ylijännitteet tasolle, jonka suojattava laitte, esimerkiksi tietokone, kestää. Hienosuoja voidaan asentaa joko keskukseen, josta suojattavaa ryhmää syötetään tai suoraan laitteen pisto- tai jakorasiaan. Peruseriaatteena on sijoittaa hienosuoja niin lähelle suojattavaa laitetta kuin mahdollista.

Suojaportaiden välissä tulee olla vähintään suojan valmistajan ilmoittama määrä induktanssia kaapelin muodossa tai erillisenä induktiivisena komponenttina. Suojien välisellä induktanssilla varmistetaan suojien oikeanlainen toiminta.

Ylijännitesuojat mitoitetaan kestäämään useita toimintakertoja, mutta ne voivat hajota jo ensimmäisellä kerralla, mikäli ylijännitteen syöksyaallon energiamäärä ylittää suojan mitoitusenergian. Hajonnut ylijännitesuoja voi toimintatavastaan riippuen rikkoutuessaan jäädä oikosulkuun tai jättää virta-

piirinsä avoimeksi. Normaali käyttötilanteessa suojan avoin virtapiiri ei näy kuluttajalle lainkaan sähkölaitteiston normaalikäytön kannalta katsottuna, mutta tilanteessa, jossa sen kuuluisi johtaa ylijännitteet maihin, se ei toimikkaan. Oikosulkuun joutunut ylijännitesuoja taas kuormittaa kiinteistön sähköverkkoa ja voi aiheuttaa tulipalon vaaran, mikäli kiinteistön ylivirtasuojauksessa on puutteita. Osassa ylijännitesuojista on indikointi, joka ilmentää suojan kuntoa, mutta osassa suojista ei ole minkäänlaista indikointia, jolloin rikkoontuneen suojan havaitseminen vaatii erillisen lisälaitteen. Oikosulkuun joutunut suoja voidaan todeta mittaamalla.

Käyttöönottotarkastuksissa varmistetaan, että kiinteistössä on oikeanlaiset ylijännitesuojat. Lisäksi tarkastuksissa tarkastetaan suojien sijoituksen ja asennuksen oikeellisuus. Ylijännitesuojien asentaminen kiinteistöön saattaa vaikuttaa eristysresistanssin mittaamiseen. Suojat saattavat vaikuttaa mittauksen tulokseen tai ne saattavat vaurioitua mittauksen aikana. Tästä syystä eristysresistanssia mitattaessa kaikki ylijännitesuojat, jotka ovat kohtuudella irtikytettävissä, tulee irtikytkeä mittauksen ajaksi. Mikäli suojia ei voida irtikytkeä kohtuuden rajoissa, kuten pistorasioihin kiinteästi asennettavat hienosuojat, voidaan eristysresistanssin mittaukseen käytettävä jännite laskea 250 V tasolle. (Sähköinfo Oy, 2017, s. 161)

4.3 Kiinteistön salamasuojaus

Puhtaan ylijännitesuojauksen lisäksi kiinteistöön on hyvä asentaa myös ulkoinen salamasuojaus, jotta kiinteistö kärsisi mahdollisimman vähän vaurioita salaman iskiessä suoraan kiinteistöön. Ilman kunnollista salamasuojausta suoraan kiinteistöön osunut salama voi aiheuttaa tulipalon ja/tai rakenteen fyysisen vaurioitumisen.

Yksinkertaisimmillaan kiinteistön salamasuojaus on yksittäinen ukkosenjohdatin, joka on liitetty maapotentiaaliin kiinteistön maadoituselektrodin kautta. Yksittäinen ukkosenjohdatin toimii hyvin pienissä kiinteistöissä kuten kesämökeissä, mutta suuremmissa ja laajemmissa kohteissa salamasuojaus on laajempi. Laajemmissa kiinteistöissä salamavirralla pyritään järjestämään reitti maahan useasta eri kohdasta, tavallisesti rakennuksen jokaisen kulman kohdalta. Lisäksi rakennuksen teräviin kulmiin tulee kiinnittää huomiota salamasuojauksen näkökulmasta, koska terävät kulmat ovat salaman iskuille erityisen alttiita. (Obo Betterman Oy, 2017)

5 YLIJÄNNITESUOJAUKSEN MALLI

5.1 Työn taustat

Keväällä 2017 olleella Projekti 3 -kurssilla tehtäväksi annettiin kehitellä oppilaitokselle opetuskäyttöön soveltuva kiinteistön ylijännitesuojauksen demolaitteisto. Projektin aikana suojaus suunniteltiin ja rakennettiin vastaamaan nykyaikaisia ylijännitesuojauksen vaatimuksia. Demolaitteiston jännitelähteeksi opettaja esitteli Kikusuin TOS 5051 jännitekestoisuustesterin, joka kykeni syöttämään 5 kV:n tasa- ja vaihtojännitteen. Tuotoksen jännitelähde osoittautui kaikin puolin epäsovivaksi, sillä sen syöttämä pulssi oli liian hidas ja suurimpana syynä kyseisen jännitelähteen 110 mA:n virtaraja, jonka ylittyttyä laite lakkasi syöttämästä jännitettä. 110 mA:n raja tuli vastaan heti, kun ylijännitesuojat alkoivat johtaa, joka tapahtui jo kilovoltin tasossa. Jännitelähteen virtarajan takia suojien toimintaa ei päästy toteamaan ollenkaan. Opinnäytetyössä tuo entinen jännitelähde on korvattu syöksyjännitegeneraattorilla, jonka pulssi vastaa melko tarkasti standardin mukaista, suojien testaamiseen käytettyä pulssia.

5.2 Yleiskuvaus

Järjestelmällä on tarkoitus tutustuttaa tulevat opiskelijat laboratoriotyön muodossa ylijännitesuojien toimintaan salamajännitteen ollessa ylijännitelähteenä. Työssä suojien toimintaan perehdytään oskilloskoopilla mittaamalla suojien jännitetasot ja jännitteen muoto sekä virrat T1+T2 ja T3 suojien jälkeen.

Ylijännitesuojat kytketään peräkkäin siten, että karkea- eli ukkossuoja on ensimmäisenä, toisenportaan suoja on toisena ja laitteen hienosuoja on viimeisenä. Suojat kytketään toisiinsa 15 metriä pitkällä kumikaapeleilla, joiden johdinten poikkipinta-ala on 2,5 mm². Ukkossuojan tulopuolelle L1-liittimeen kytketään syöksyjännitegeneraattorin syöttämä pulssi ja tulopuolen maadoitusliittimeen kytketään maapotentiaali.

Oskilloskoopin mittapäät kytketään mitattavien suojan lähtöpuolen L1-liittimiin banaani liittimillä. Mittapäiden maadoitus tapahtuu kytkemällä mittapäiden maadoitusjohtimet hauenleuoilla kupariseen maadoituskiskoon.

Ylijännitesuojien jännitetaso ja jännitteen muoto mitataan oskilloskoopilla. Oskilloskoopista asetellaan jännitetasoksi kanavaan yksi 1 kV/ ruutu ja aika-asetteluksi asetetaan 20 mikrosekuntia. Kanavaan kaksi asetellaan jännitetasoksi 500 V/ ruutu.

Jotta jännitteen käyrämuoto saataisiin tallennettu työselostusta varten, täytyy oskilloskooppiin asettaa liipaisuraja, joka on 500 V ja se asetellaan kanavaan yksi. Oskilloskoopin asetuksissa jännitemittapäiden vaimennus asetellaan arvoon 1000:1 ja virtamittapäiden vaimennus asetellaan arvoon 10:1.

5.3 Rakentaminen

Osa laitteistosta oli jo valmiina olemassa, sillä tämä opinnäytetyö jatkaa kevään 2017 Projektin 3-kurssilla aloitettua työtä. Kevään 2017 projektikurssilla ylijännitesuojat koteloitiin ja suojien liittämisen jännitelähteeseen ja suojien kytkeminen peräkkäin mahdollistettiin banaaniliittimillä. Lisäksi suojien väliset kaapelit olivat valmiina banaaniliittimiä myöten.

Varsinainen rakentaminen alkoi mittausta varten tarkoitetun kytkentäkotelon kokoonpanolla. Työn edetessä mittaustapa vaihtui ja kytkentäkotelo jäi lähinnä Marxin generaattorin syöttämän pulssin mittaukseen. Kytkentäkotelon jälkeen vuorossa oli työpöydän metalliosien maadoitus. Maadoitus tehtiin $2,5 \text{ mm}^2$ hienosäikeisellä kelta-vihreällä (kevi) maadoitusjohtimella.

Maadoitusten jälkeen valmisteltiin johdin, jota pitkin syöksyjännitegeneraattorin pulssi tuotiin suojille. Johdin koostui NKT-suurjännitejohtimesta, johon liitettiin juottamalla uros-banaaniliittimet molempiin päihin. Johtimen eristystä vahvistettiin juotoksien ja banaaniliittimien kohdalta useilla kutistesukkakerroksilla.

5.4 Testaus

5.4.1 Mittalaitteisto ja tulosten tulkinnalliset seikat

Mittalaitteisto koostui aluksi Gw instek GDS-2102 kaksikanavaisesta oskilloskoopista, Testec TT-HVP 15 HF ja Fluke 80K-6 suurjännitemittapäistä. Virtoja mitattiin Fluken i30s-mittapäillä. Testekin mittapää on oskilloskoopin kanavassa 1 ja Fluken mittapää kanavassa kaksi.

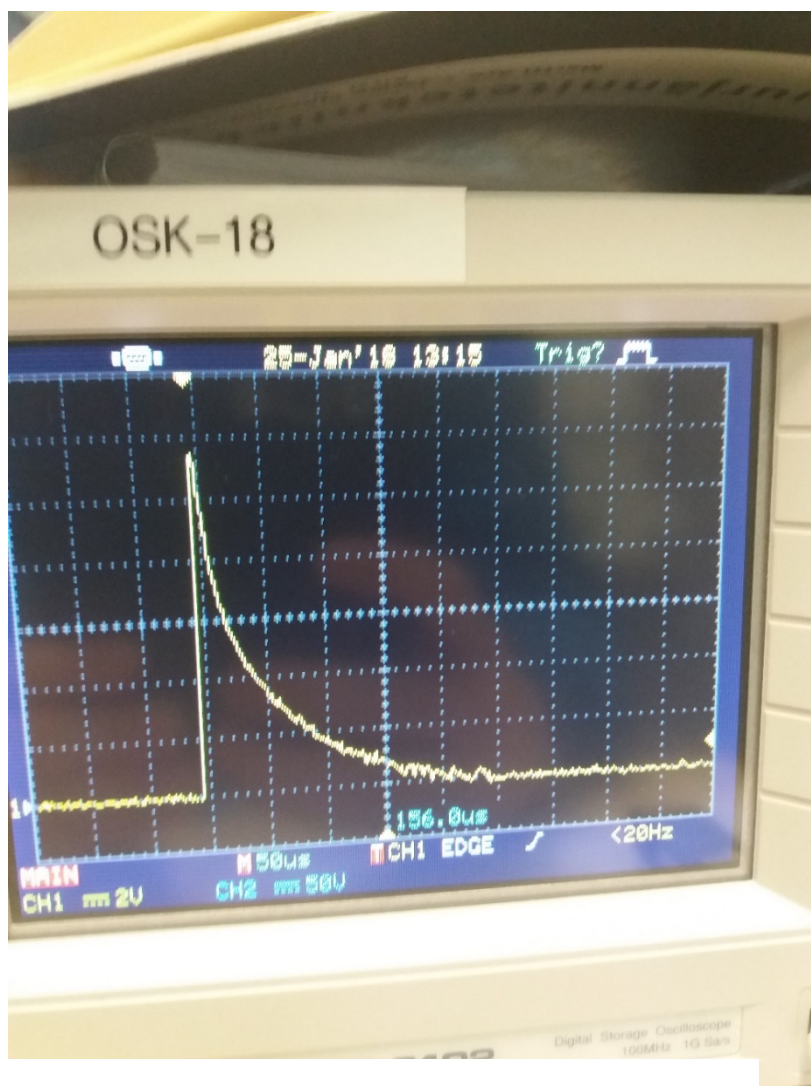
Työssä esitetyissä Gw instek -oskilloskoopin kuvissa yksi ruutu on tuhatkertainen kuvassa esitettyyn jännitteeseen verrattuna, koska käytössä olevien suurjännitemittapäiden suhdeluku on 1000:1. Esimerkiksi ruudulla näkyvä 500 millivoltia vastaa todellisuudessa 500 voltia. Kuvissa kanava yksi on keltainen ja kanava kaksi on sininen.

Myöhemmin suojien valmistajalta tuli pyyntö tarkemmista ja laajemmista lisätesteistä, jolloin neljän yhtäaikaisen mittaussuureen takia Gw instekin oskilloskooppi jouduttiin korvaamaan Yokogawa DLM 2024 oskilloskoopilla, jossa on neljä mittauskanavaa.

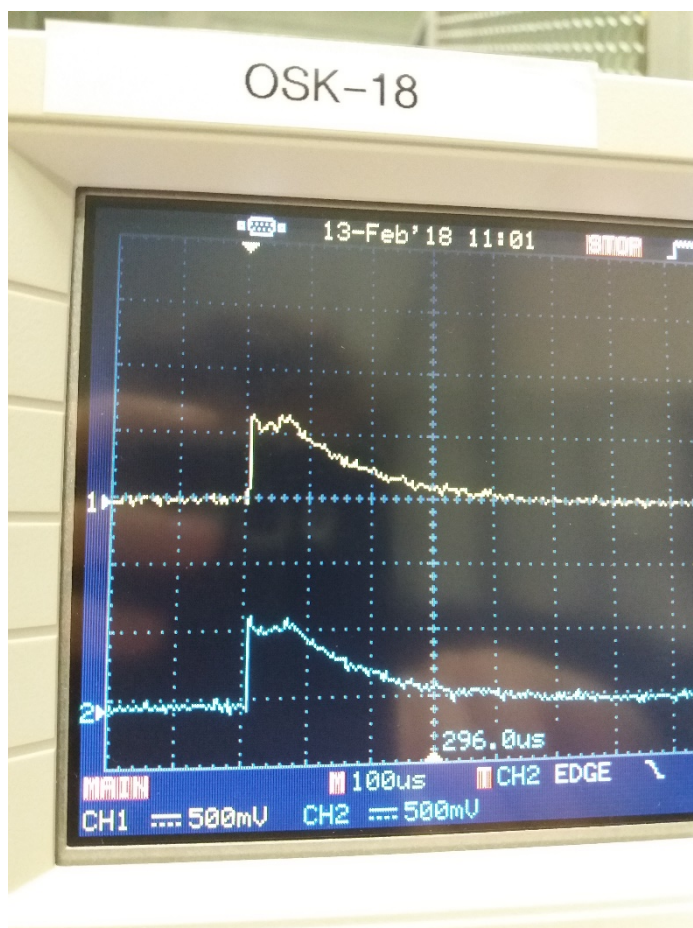
5.4.2 Alkuperäisen suunnitelman mukaan tehdyt testaukset

Ensimmäisissä testeissä ylijännitesuojia testattiin 10 kV:n lataavalla tasajännitteellä ja alkuperäisellä kytkennällä, jonka pulssimuoto oli $0,83 / 45,9 \mu\text{s}$. Pulsseja tuli noin sekunnin välein ja oskilloskoopilla mitattiin pulssin suuruus ja muoto. Suojien toiminta herätti kummastusta, sillä suojat laskivat usein syötettävän pulssin huippuarvon läpi joko vaimentamatta sitä ollenkaan tai vaimentaen sitä hyvin vähän.

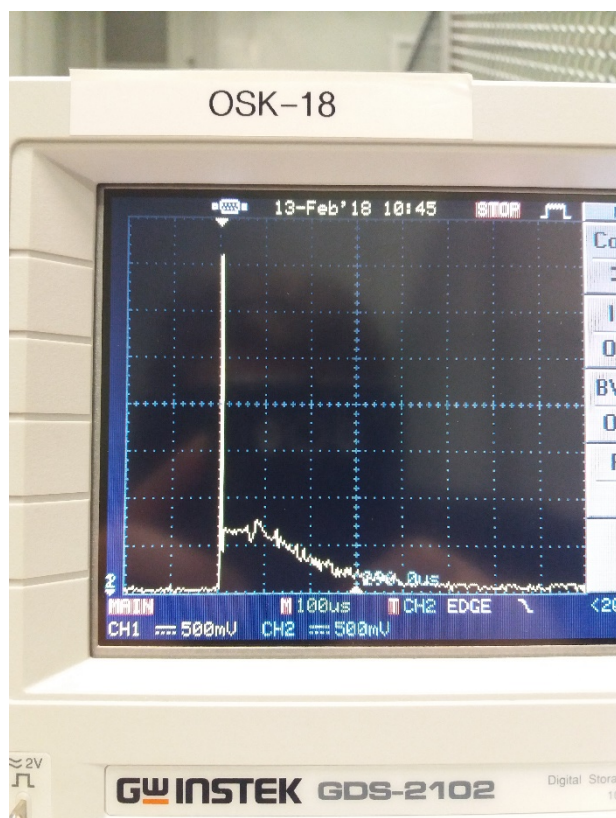
Koe toistettiin siten, että aluksi pulssien välissä oli viisi minuuttia ja sen jälkeen kymmenen minuuttia. Tuloksissa huipun läpi meno harventui, mutta sitä tapahtui huolestuttavan usein silti. Kuvassa 6 on esitetty 0,83 / 45,9 μ s muotoa olevan pulssin käyrämuoto ja kuvissa 7 ja 8 on esitetty suojista läpi menneitä pulsseja.



Kuva 6. Käyrämuoto 0,83 / 45,9 μ s pulssille



Kuva 7. Suojista T1+T2 ja T3 läpi mennyt jännite, kun suojat toimivat suunnitellusti

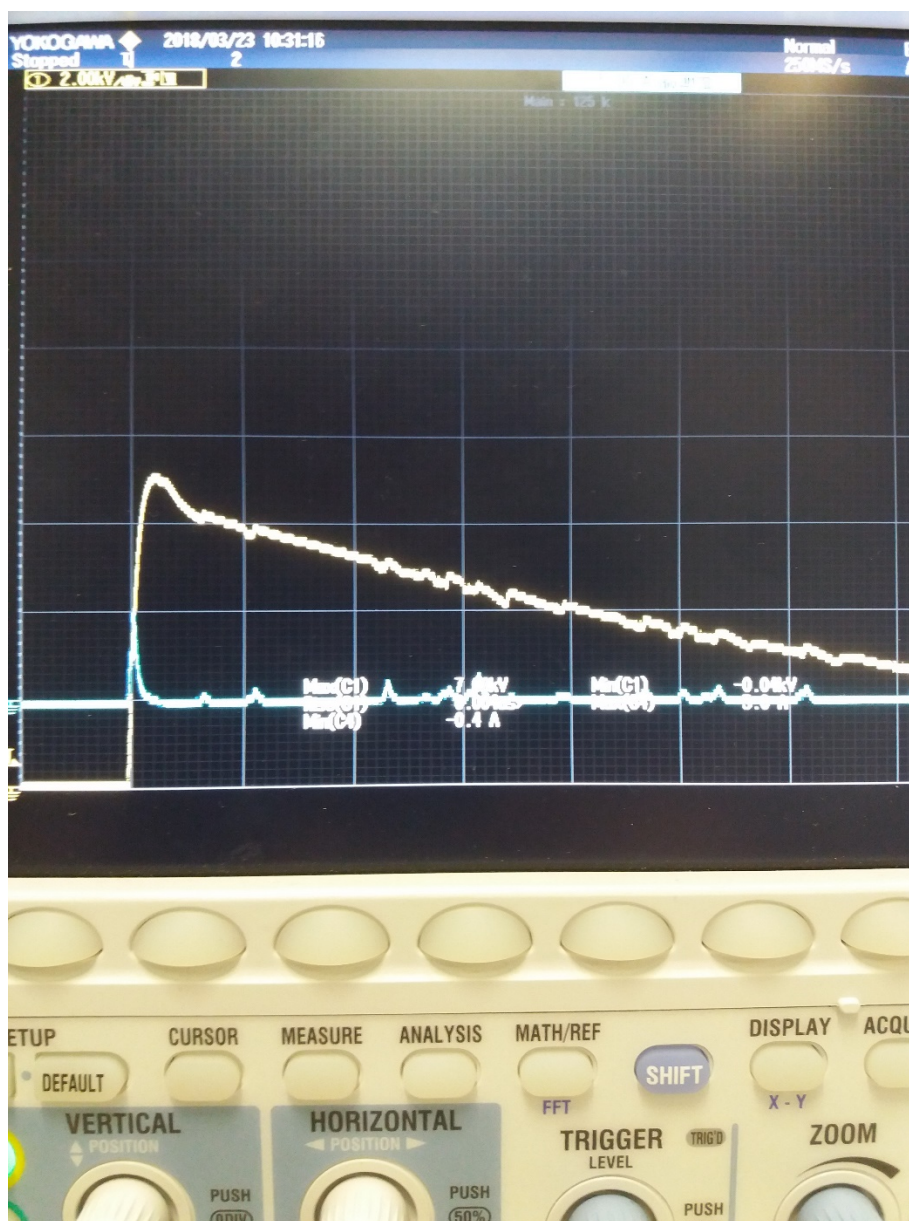


Kuva 8. T1+T2 suojan jälkeinen jännite, kun suoja on laskenut huipun läpi

Testien tulokset ja metodit lähetettiin suoja valmistavan yrityksen edustajalle, joka kertoi testauksissa käytettävän pulssin olevan liian nopea. Tämän jälkeen testipulssia alettiin muokata hitaammaksi luvussa 3.2 kuvatuilla tavoilla.

5.4.3 Lähes standardimuotoisella pulssilla suoritettut testit

Uudistetulla kytkennällä testaukset aloitettiin 10 kV:n lataavalla tasajännitteellä, jolloin ukkosta matkivan pulssin jännite on noin 7 kV ja pulssien välillä oli 5-10 sekuntia. Suojissa tapahtui samaa ilmiötä kuin aiemminkin, mutta huomattavasti harvemmin. Kuvassa 9 on esitetty käyrämuoto pulssille, joka on muotoa 12 / 263 μ s. Kuvassa oleva sininen käyrä on virta, jonka Marxin generaattori tuottaa. Virralle pätee virtapihdin muuntosuhde 100 millivolttia = 1 ampeeri. Kuvassa oleva virta on suurimmillaan hieman yli ampeeri



Kuva 9. Uudistetun kytkennän tuottaman pulssin muoto

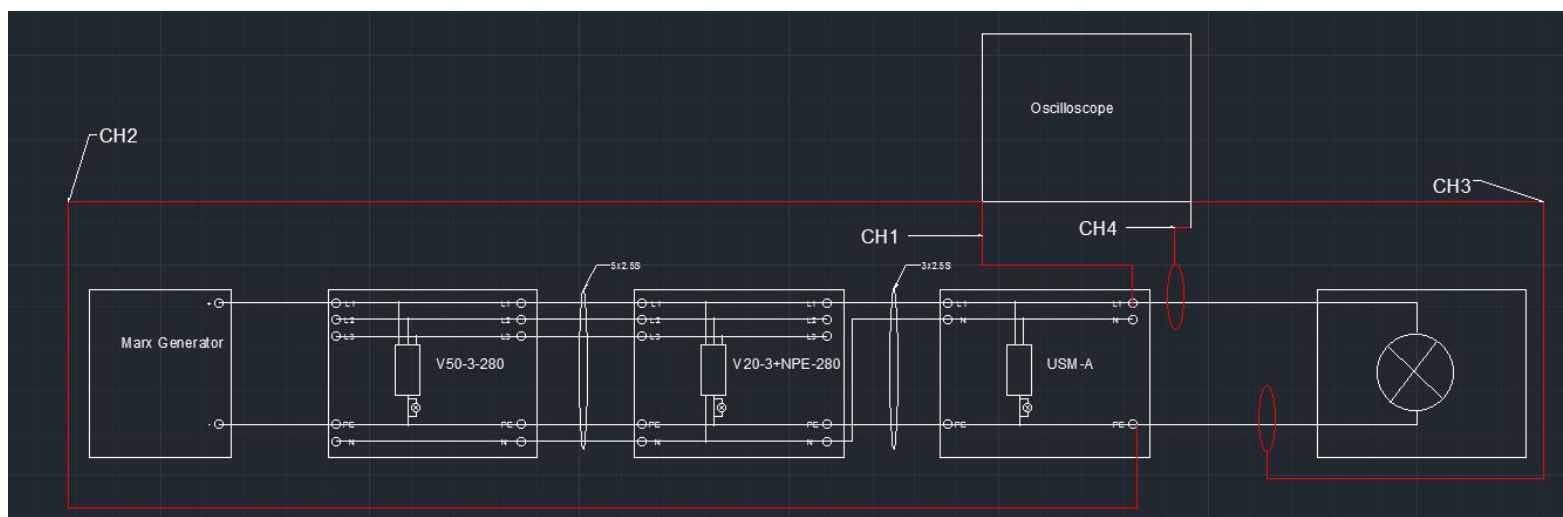
Tämän jälkeen pulssien väli kasvatettiin viiteen minuuttiin, ja lataava tasajännite nostettiin 20 kV: iin, jolloin testipulssin jännite on noin 14,7 kV. Testejä tehtiin viiden sarjoissa, ja ainostaan yhdessä viidestä tehdyistä testeistä suojat laskevat läpi piikin, jonka huippuarvo oli suuruudeltaan 3 kV.

Testejä jatkettiin suojia valmistavan yrityksen pyynnöstä laajennetulla testiohjelmalla, jonka tulokset luovutettiin yrityksen analysoitaviksi. Testejä jatkettiin käyttäen kolmea eri lataavan tasajännitteen tasoa. Tasot olivat 10 kV, 20 kV ja 30 kV. Pulssien välissä oli 5 minuuttia ja mittaukset tehtiin kymmenen mittauksen sarjoissa, joista katsottiin kuinka usein suojat laskevat läpi pulssin.

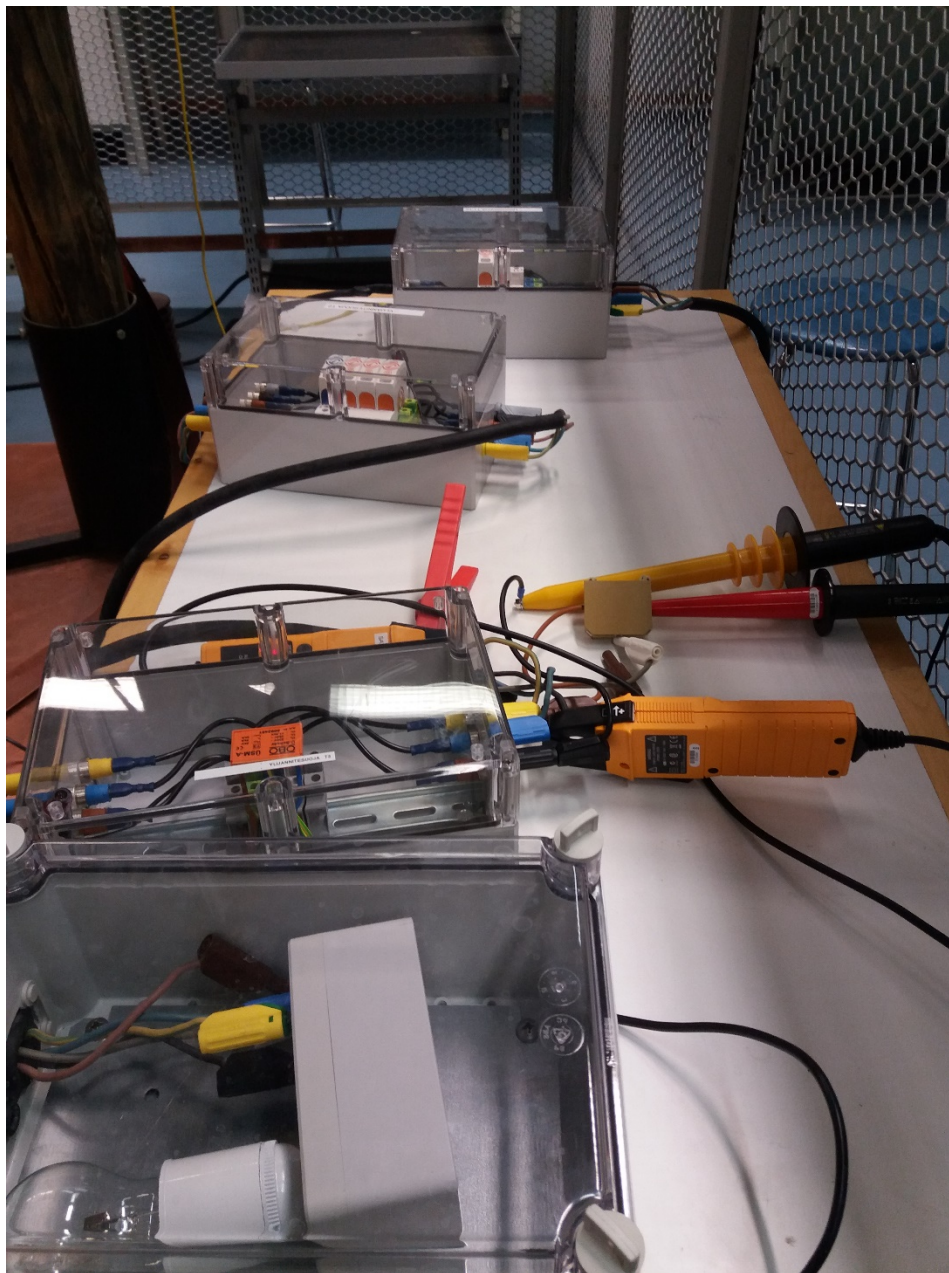
Testeissä ilmeni, että aikaisemmat testit ovat saaneet suojat toimimaan hyvin epävarmasti ja ne eivät rajoittaneet jännitteitä edes standardin minimi vaatimuksien vaatimalle tasolle, puhumattakaan suojien valmistajan ilmoittamasta tiukemmasta tasosta. Mahdollisia syitä suojien vanhenemiselle saattoivat olla aikaisemmin tiheämpi pulssien syöttö ja/tai 0,83/46 μ s pulssi, joka oli nopeampi kuin pulssi, jolta suojat on suunniteltu suojaamaan.

Valmistajan pyynnöstä tehtiin testeihin tuli uutena lisänä virran mittaus ja kuormana toimiva halogeenilamppu. Lamppu kytkettiin kulloinkin testattavan suojan perään.

Mittausjärjestelyt muuttuivat paljon edellisiin testeihin verrattuna, koska suojien valmistaja halusi saada selville kunkin suojan läpi menevän virran ja jännitteen lisäksi myös maadoituksessa esiintyvät virrat ja jännitteet. Tästä syystä oskilloskooppi jouduttiin vaihtamaan nelikanavaiseen Yokogawa DLM 2024 oskilloskooppiin. Jännitemittapäät olivat samoja, joita käytettiin aiemmissa testeissä ja virtamittapäinä käytettiin Fluken i30s-virtamittapäitä. Kuvassa 10 on esitetty mittausjärjestelyjen kytkentäkuva, kun mitataan T3 suojaa ja kuvassa 11 on esitetty toteutunut mittausjärjestely. Kuvassa 11 takimmainen suoja on T1+T2 suoja, keskimmäinen on T2 suoja ja lähimpänä kameraa oleva suoja T3 suoja. Kuvassa etualalla olevassa laatikossa on kuormana toimiva halogeenilamppu.



Kuva 10. Kytchentäkuva, kun mitataan suojaa T3

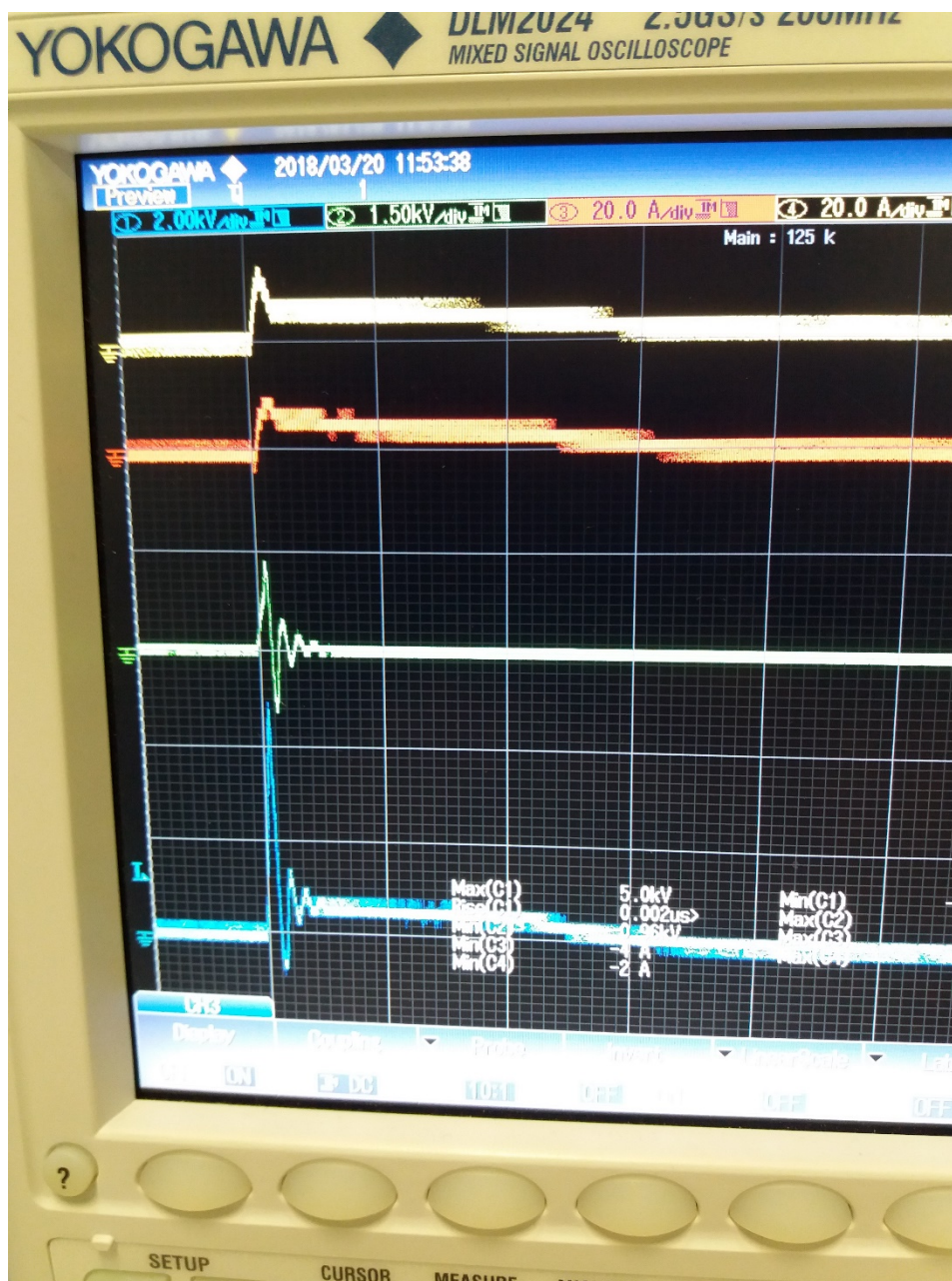


Kuva 11. Toteutuneet mittausjärjestelyt.

Kytkenän periaate ja mittauspisteet ovat samat mitattaessa ylempiä suoja, ainoastaan alempi suoja poistuu ja kuorma liitetään seuraavaan suojaan. Alempien suojien mittaukset suoritettiin aina T1+T2 suojan läpi, jotta suojille ei aiheutuisi enempää vahinkoa kuin tähän asti on ehditty tuottaa.

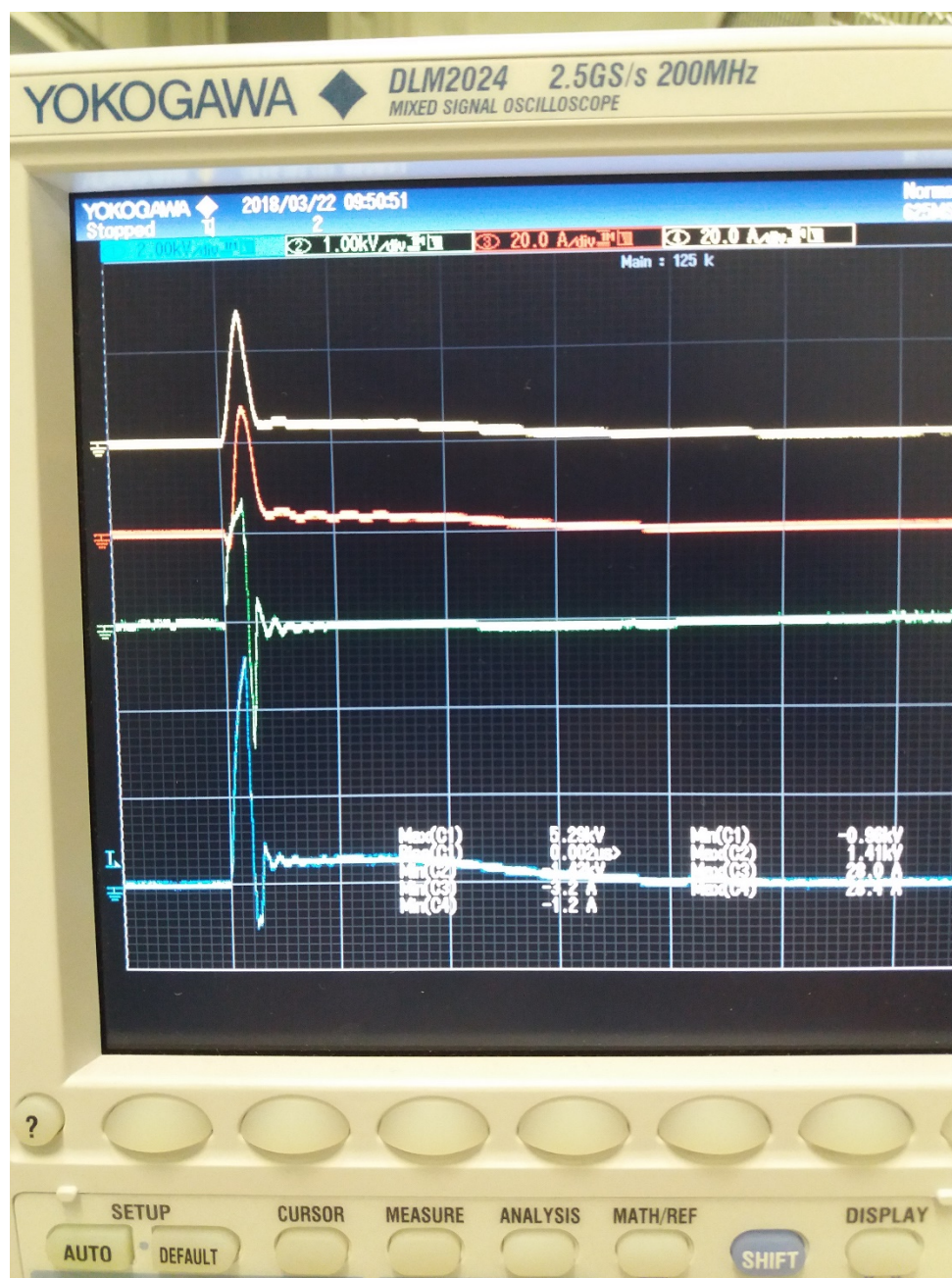
Mittaukset suoritettiin kolmella eri jänniteportaalla ja kukin suoja testattiin kyseisillä jänniteportailta kymmenen kertaa, eli testejä kertyi yhteensä yhdeksänkymmentä kappaletta. Testeistä kerättiin Excel-taulukko suojista läpimenneiden jännitteiden ja virtojen huippuarvojen lisäksi myös maa-doituksessa esiintyneiden virtojen ja jännitteiden huippuarvot. Kuvissa 12, 13 ja 14 on esitetty joita-

kin testien tuloksia. Kuvissa sininen käyrä edustaa suojusta läpi mennyttä jännitettä, vihreä maadoituksessa esiintyvää jännitettä, punainen maadoituksessa esiintyvää virtaa ja keltainen suojusta läpi mennyttä virtaa.

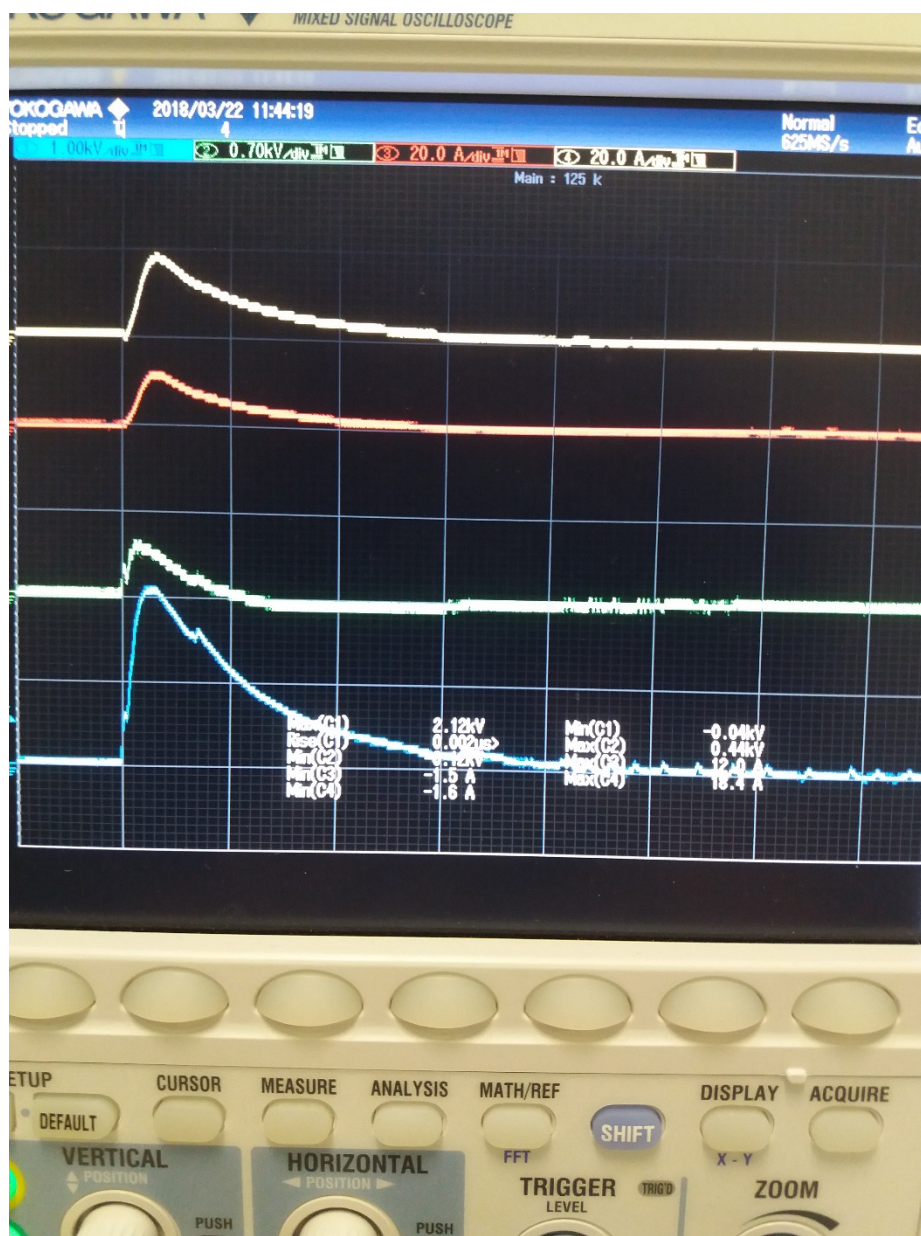


Kuva 12. T1+T2 suojan mittattaustulos 30 kV:n jännitteellä.

Kuvista 12 ja 13 huomataan, että suojusta läpi menneen jännitteen käyttäytyminen (sinine käyrä) ei ole toimivalle suojalte ominainen. Kuvan 7 (toimivan suojan käyrämuoto) käyrään verrattuna kuvien 12 ja 13 käyrämuodot ovat jyrkempiä ja läpi menee huomattavan suuri piikki, joten voidaan todeta, että suojaus ei toimi suunnitellusti kuvissa 12 ja 13.



Kuva 13. T2 suojan mittaustulos 20 kV:n jännitteellä.



Kuva 14. T3 suojan testaustulos 10 kV:n jännitteellä.

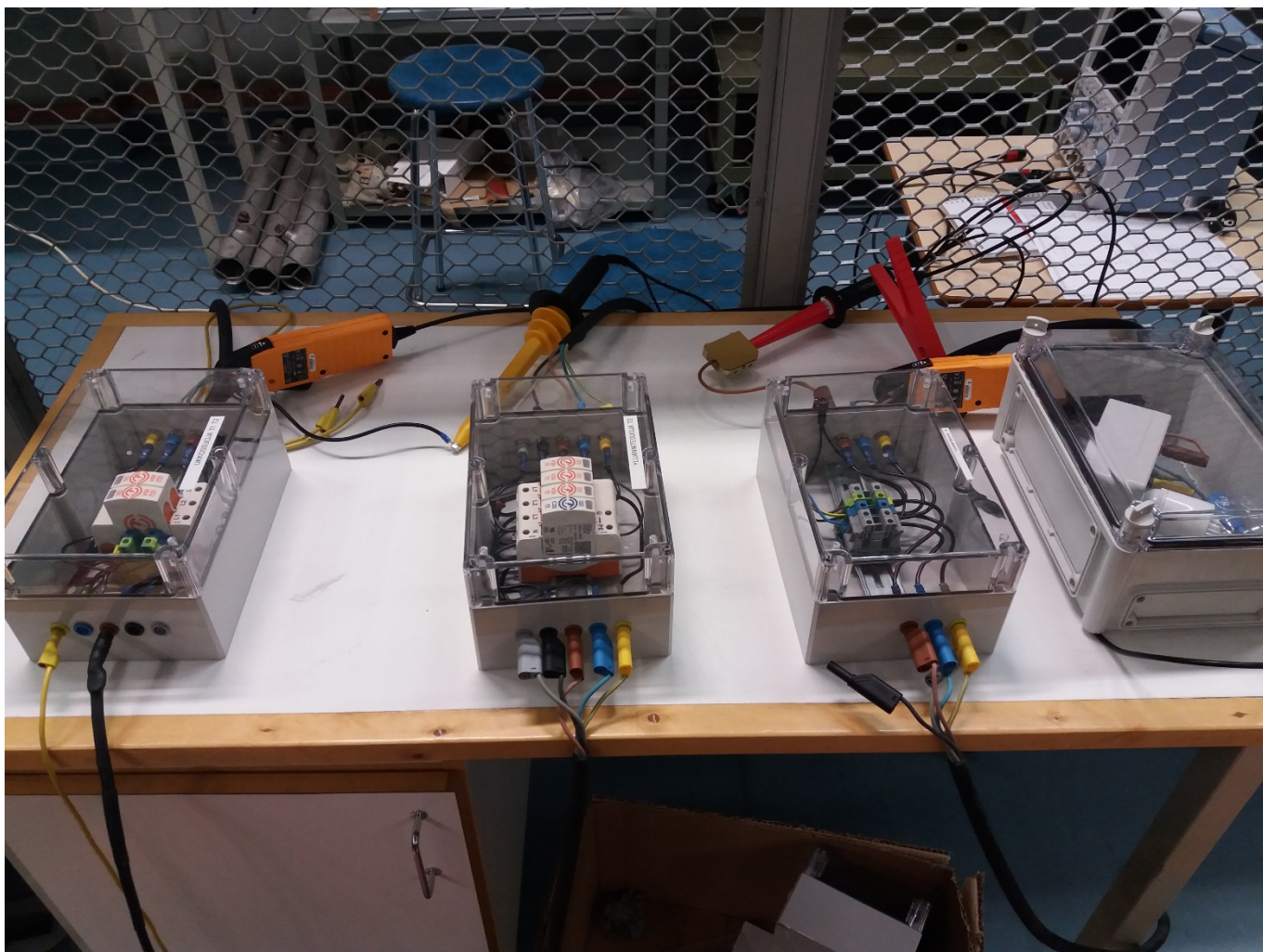
Kuvassa 14 esitetyssä käyrässä suojaus ei toimi suunnitellusti, koska suojasta läpi menneen jännitteen huippu arvo on yli 2 kV. Lisäksi käyrä laskee liian jyrkästi toimivan suojan käyrään verrattuna.

5.5 Laboratoriotyön yleisjärjestely

Marxin generaattori rakennetaan kuvan 3 osoittamalla tavalla, jonka jälkeen suojat asetetaan mitausta varten suurjännitehakin sisään kannetulle pöydällä. Suojien väliset kaapelit kytketään nykyisten värikoodien mukaan vastaaviin liittimiin L1, L2, L3, N ja PE. Kaapelit tulee levittää häkin sisäpuolelle siten, että kaapeleihin tulee mahdollisimman vähän ja mahdollisimman laajoja lenkkejä induoituneiden jännitteiden välttämiseksi. Laboratoriotyön tarkempi kuvaus ja toteutus on esitetty liitteissä 1, joka on laboratoriotyön työohje.

Mittauksissa käytetään Yokogawa DLM 2014 oskilloskooppia. Oskilloskoopin mittapääät kytketään suojien T1+T2 ja T3 lähtöpuolelle vaiheliittimeen. Oskilloskooppi käynnistetään ja tehdään seuraavaksi kuvatut asetukset. Kanavaan 1 asetellaan jännitetasoksi 1 kV/ ruutu ja kanavaan 2 jännitetasoksi 500 V/ ruutu. Kanavaan 1 asetetaan liipaisuraja, jonka arvo on välillä 500 V. Liipaisu moodina on nouseva reuna ja yksittäinen liipaisu. Oskilloskoopin aika-asetteluksi asetetaan 20 μ s. Aika-asettelua voi muuttaa tarvittaessa kuvaajien ollessa pysäytettynä ruudulla.

Mittauksia tehdään 10 kappaletta kahdella eri jännitetasolla. Lataavan tasajännitteen arvot ovat 10 ja 30 kV ja mittausten välillä on oltava vähintään viisi minuuttia, jotta suojat ehtivät palautua. Mittauksista taltioidaan suojista läpimenneiden jännitteiden huippuarvot sekä jännitteiden ja virtojen käyrämuodot. käyrämuodot voidaan tallentaa oskilloskoopista muistitikulle, mutta on suositeltavaa ottaa myös ruudusta valokuva. Suojista läpimenneistä jännitteistä lasketaan kaikkien mittausten jälkeen keskiarvo. Opiskelijat arvioivat läpimenneiden jännitteiden huippuarvojen, laskemiensa keskiarvojen ja käyrämuotojen perusteella suojien toimintaa. Kuvassa 15 on esitetty suojien sijoitus laboratoriotyötä varten.



Kuva 15. Suojien ja kuorman sijoitus pöydälle laboratoriotyössä

Laboratoriotyön lisäelementtinä on lamppu, jolla havainnollistetaan mitä voi tapahtua, mikäli ylijännitesuojausta ei ole. Lamppu kytketään varsinaisten mittausten ajaksi laitesuojan taakse. Mittausten

lopuksi lamppu kytketään suoraan Marxin generaattoriin ilman suojia ja katsotaan mitä tapahtuu. Tällaisella järjestelyllä opiskelijat saavat toivottavasti kuvan ylijännitesuojauksen tarpeellisuudesta.

6 YHTEENVETO JA POHDINTA

Työn tarkoitus oli perehtyä kiinteistön ylijännitesuojaukseen ukkosen aiheuttamia ylijännitteitä vastaan ja tuottaa oppilaitokselle laboratoriotyön muodossa kokonaisuus, jolla opiskelijat pystytään perehdyttämään kiinteistön ylijännitesuojauksen toimintaan. Työ paisui sen edetessä johtuen ylijännitesuojien yllättävistä toiminnoista. Kun valmistaja kuuli kummallisuuksista, he pyysivät lisätestejä laajemmalla ja tarkemmalla testiohjelmalla.

Työ oli lopulta laajempi ja monipuolisempi kuin aluksi suunniteltiin. Alun alkaen tarkoituksena oli pelkästään luoda laboratoriotyö, jossa perehdytään ylijännitesuojien toimintaan.

Työn edetessä vastaan tuli standardeja, joihin piti perehtyä, jotta testaukset saataisiin mahdollisimman tarkoiksi ja ammattimaisiksi. Testien suuri määrä ja suunta, johon työ alkoi lähteä, yllätti täysin. Lopputuloksena syntyi odotetusti laboratoriotyö, mutta sen lisäksi suojien valmistaja kiinnostui tehdyistä testeistä ja pyysi lisää tarkempia testejä, jotta saisi selville, ovatko huolestuttavat ilmiöt pelkästään testien järjestelyjen aiheuttamia.

Työssä oppi hyvin ylijännitesuojauksen toiminnan lisäksi myös mittausteknisiä asioita, kuten mitausta vääristävien tekijöiden tunnistamisen ja niiden eliminoinnin merkityksen. Myös oskilloskooppi ja sen virittäminen tulivat tutuksi työn edetessä.

Työtä voisi vielä jatkokehittää siten, että suojille tuotaisiin muusta sähköverkosta erillisellä jännitelähteellä tuotettu 50 Hz:n signaali, jonka päälle ylijännitepulssi syötettäisiin. Edellä kuvattu järjestely vastaisi todellista tilannetta laboratoriokoossa.

Työn tavoitteet täyttyivät, sillä oppilaitos sai kaipaamansa laboratoriotyön työohjeineen, päivitettyt kuvat syöksyjännitegeneraattorista ja materiaalin, jossa perehdytään ylijännitesuojaukseen ja testaukseen. Tuotosten valossa työtä voi pitää onnistuneena.

7 LÄHDELUETTELO

(1. 3 2013). Haettu 18. 1 2018 osoitteesta Sähköala.fi:

http://www.sahkoala.fi/koti/ukkokssuojaus/fi_FI/uusissa_sahkoliittymissa_vaaditaan_ylijannitesuojausta/

Aro, M.;Elovaara, J.;Karttunen, M.;Nousiainen, K.;& Palva, V. (2003). *Suurjännitetekniikka*. Otatieto.

Ilmatieteen laitos. (2018). (Ilmatieteen laitos) Haettu 29. 1 2018 osoitteesta <http://ilmatieteenlaitos.fi/perustietoa-ukkosesta>

Obo Betterman Oy. (20. 4 2017).

Suomen Standardisoimisliitto ry. (2017). *SFS 6000-4-44:2017 Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-44: Suojausmenetelmät*. Helsinki.

Sähköinfo Oy. (2012). ST 53.16.01 Rakennusten salamasuojaus.

Sähköinfo Oy. (2017). D1-2017 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Espoo, Suomi.

The International Electrotechnical Commission. (2011). IEC 61643-11 Low-voltage surge protective devices- Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage systems- Requirements and test methods. Geneve, Sveitsi.

TUKES. (ei pvm). Haettu 2. 2 2018 osoitteesta http://www.tukes.fi/tiedostot/sahko_ja_hissit/faq/ukkokssuojaus.pdf

8 LIITTEET

LIITE 1 LABORATORIOTYÖN TYÖOHJE

**SAVONIA**

MUU RAPORTTI - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

KIINTEISTÖN YLIJÄNNITE- SUOJAUKSEN MALLI

Suurjännitetekniikka

Työohje

Versio 1.0/13.4.2018

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	35
2	ENNAKKOTEHTÄVÄT	35
3	LAITTEET	35
4	MITTAUSKYTKENTÄ.....	36
5	OSKILLOSKOOPPI.....	37
5.1	Perusasetukset	37
5.2	Jännitetasosta riippuvia asetuksia	38
5.2.1	Lataava tasajännite 10 kV	38
5.2.2	Lataava tasajännite 30 kV	38
6	MITTAUKSET	38
7	TYÖSELOSTUKSEEN	38

1 JOHDANTO

Työntarkoituksena on perehtyä ylijännitesuojien toimintaan ukkosen aiheuttamia ylijännitteitä vastaan. Työssä ukkosta matkiva pulssi tuotetaan Marxin generaattorilla.

Suojat on suunniteltu pulssille, jonka muoto on 10/350 μ s, mutta käytössä on pulssi, joka on muotoa 12/263 μ s. Pulssin muodosta voi aiheutua pieniä muutoksia suojien toimintaan, mutta oikea salama on hyvin sattumanvarainen ilmiö, jonka pulssin muoto ei ole millään muotoa vakio. Näin ollen pulssin muodolla ei saa olla merkittävää vaikutusta suojien toimintaan.

IEC standardeissa määritetään suojien jälkeiselle jännitteelle hyväksytyt tasot. Standardin mukaan jännitetasojen tulee olla seuraavat ylijännitesuojien jälkeen (suluissa oleva arvo on valmistajan itselleen asettama raja-arvo):

T1(T1+T2)	<4 kV (1,5)
T2	<2,5 kV (1,5)
T3	<1,5 kV (1).

2 ENNAKKOTEHTÄVÄT

Tutustu Moodlesta olevaan materiaaliin, joka koskee ylijännitesuojausta ja testauksia sekä työohjeeseen. Lisäksi tulosta mittauspöytäkirja Moodlesta.

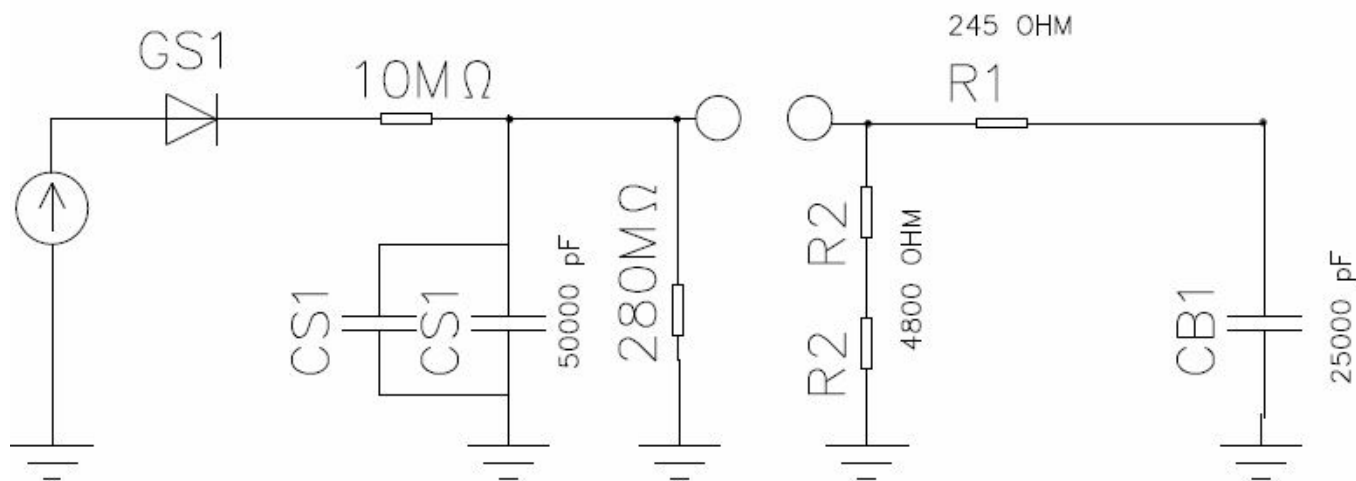
3 LAITTEET

Työssä mitataan ylijännitesuojien jälkeinen jännite käyttäen oskilloskooppia. Laitteistona on:

Yokogawa DLM 2024 oskilloskooppi
 Testec TT-HVP 15 HF suurjännitemittapää (keltainen)
 Fluke 80K-6 suurjännitemittapää (punainen)
 2 kpl Fluke i30s virta mittapäitä
 koteloidut T1+T2, T2 ja T3 suojat
 Kaksi kerää kumikaapelia (pituus 15 m)
 koteloitu hehkulamppu ja liitosjohto
 Marxin generaattori
 Muistitikku ja/tai (kännykkä)kamera

4 MITTAUSKYTKENTÄ

Marxin generaattori rakennetaan kuvan 1. osoittamalla tavalla.



Kuva 2. Marxin generaattorin kytkentäkuva

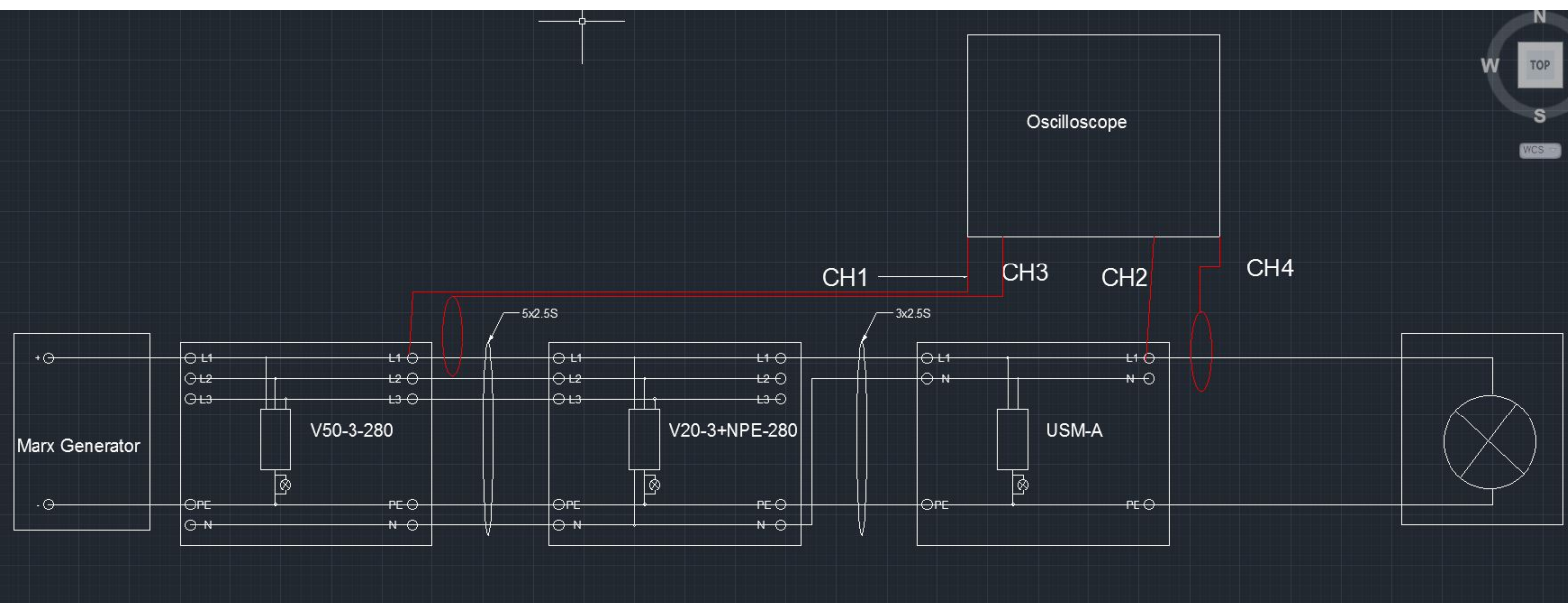
Marxin generaattori rakennetaan teknisistä syistä kahdella pallokipinävälillä, mutta ainoastaan ylemmää pallokipinäväliä käytetään kytkimenä. Marxin generaattoria rakennettaessa on syytä tarkastaa, että ylempi pallokipinäväli on pienempi kuin alempi. Mikäli näin ei ole ylempi pallokipinäväli tulee ruuvata noin puolet pienemmäksi kuin alempi, sillä kipinän tulee syttyä ainoastaan ylemmässä kipinävälissä.

Kun Marxin generaattori on rakennettu, suojat ja kuormana toimiva lamppu asetetaan pöydälle mahdollisimman kauas toisistaan pöydän asettamissa puitteissa. suojien T1+T2 ja T2 sekä T2 ja T3 väliset kumikaapelit levitetään hängkiin siten, että kaapeleihin tulee mahdollisimman vähän ylimääräisiä lenkkejä ja syntyneet lenkit tulee pitää mahdollisimman laajoina ylimääräisestä induktanssista syntyvien mittaushäiriöiden välttämiseksi. Kaapelit pyritään mahdollisuuksien rajoissa pitämään poissa kuparilevyttä

Kaapelit kytketään nykyisten värikoodien mukaisesti (L1=ruskea, L2=musta, L3=harmaa, N=sininen, PE=kelta-vihreä). Ukkosta matkiva pulssi tuodaan ukkossuojan (T1+T2) tulopuolen L1 liittimeen mustalla erikoisvalmisteisella johtimella ja tulopuolen PE liittimeen kytketään maadoitus, joka on yhteydessä Marxin generaattorin maadoitettuihin osiin. Koteloitu lamppu kytketään T3 suojan perään siten, että vaihetta pitkin pulssi tuodaan lampulle, mutta normaalista kytkennästä poiketen, pulssi johdetaan lampulta pois keltavihreällä johtimella.

Keltainen jännitemittapää kytketään oskilloskoopin kanavaan 1 ja punainen mittapää kanavaan 2. keltainen mittapää kytketään T1+T2 suojan lähtöpuolen L1 liittimeen ja punainen mittapää kytketään T3 suojan lähtöpuolen vaiheliittimeen. Mittapäiden maadoitus on toteutettu hauenleuoilla. Kytke hauenleuat kupariseen potentiaalintasauskiskoon ennen mittauksia.

Ensimmäinen virtapihti kytketään T1+T2 suojalta T2 suojalle lähtevään L1 johtimeen. Kytke tämä virtapihti kanavaan 3. Toinen virtapihti kytketään T3 suojalta kuormana toimivalle lampulle lähtevään vaihejohtimeen. Kytke T3 suojan jälkeistä virtaa mittaava pihti kanavaan 4. **Varmista, että virtapihdit on kytketty päälle liukukytimestä.** Osoituksena on punainen LED –merkkivalo. Yksityiskohtainen kytkentäkuva suojille ja mittapäille on esitetty kuvassa 2.



Kuva 3. Kytkentäkuva suojille ja mittapäille.

HUOM! Keltainen mittapää kestää korkeampaa jännitettä kuin punainen mittapää. Keltaisen mittapään on **AINA** oltava T1+T2 suojan jälkeistä jännitettä mittaava mittapää!

5 OSKILLOSKOOPPI

5.1 Perusasetukset

Aika-asetus: 20 μ s/ruutu

Liipaisu (trigger) kanavaan 1

yksittäinen liipaisu (Single trigger) nousevalla reunalla (rising edge)

Liipaisutaso: 500 V mikäli jännitetason noston jälkeen skooppi ei liipaise nosta liipaisuraja 1000 V: iin

Kanavien 1 ja 2 probe vaimennus (attenuation) asetetaan 1000:1

Kanavien 3 ja 4 probe vaimennus asetetaan 10:1

Kanavat 1 ja 2 asetetaan jännitekanaviksi

Kanavat 3 ja 4 asetetaan virtakanaviksi

Kanavien 1 ja 2 kaistanleveys (bandwidth) asetetaan 1 MHz

Kanavien 3 ja 4 kaistan leveys asetetaan 125 kHz. Mikäli kaistanleveyttä ei asetella virtakanavilla oikeaan arvoon, virran arvot ovat mitä sattuu.

Lisäksi huippu- ja minimiarvoja varten kannattaa measure –valikon items –osiosta laittaa kanavien 1 – 4 huippu- ja minimiarvojen osoitukset päälle.

5.2 Jännitetasosta riippuvia asetuksia

5.2.1 Lataava tasajännite 10 kV

Kanavan 1 jännitetaso: 1 kV/ruutu

Kanavan 2 jännitetaso: 0,7 kV/ruutu

Kanavan 3 virtataso: 20 A/ruutu

Kanavan 4 virtataso: 20 A/ruutu

5.2.2 Lataava tasajännite 30 kV

Kanavan 1 jännitetaso: 2,5 kV/ruutu

Kanavan 2 jännitetaso: 1,5 kV/ruutu

Kanavan 3 virtataso: 15 A/ruutu

Kanavan 4 virtataso: 15 A/ruutu

6 MITTAUKSET

Mittaukset suoritetaan kahdella lataavan tasajännitteen arvolla, jotka ovat 10 kV ja 30 kV. Mittauksissa mitataan T1+T2 ja T3 suojien toimintaa virran ja jännitteen näkökulmasta. Mittaukset suoritetaan kymmenen mittauksen sarjoissa siten, että 10 kV:lla suoritetaan kymmen mittausta ja 30 kV:lla suoritetaan kymmenen mittausta. Jokaisen mittauksen välissä on oltava vähintään viisi minuuttia taukoa, jotta suojat ehtivät palautua.

Jokaisen mittauksen jälkeen kirjataan mittauspöytäkirjaan virtojen ja jännitteiden huippuarvot ja tallennetaan oskilloskoopin ruudun kuva muistitikulle ja/tai kameran muistiin. Kun olet ottanut talteen mittaustulokset ja kuvan, tyhjennä oskilloskoopin ruutu seuraavaa mittausta varten. Kun kaikki mittaukset on suoritettu, jännitteiden huippuarvoista lasketaan jänniteporraskohtaisesti keskiarvot.

7 TYÖSELOSTUKSEEN

Esitellään mittaukset sekä niiden tulokset kommentteineen ja arvioineen. Lisäksi laskut huippuarvojen keskiarvoista.

Etsi oskilloskoopin kuvista ja huippuarvoista standardiarvoista poikkeavia ylityksiä ja pohdi mistä ylitykset voisivat johtua. Raporttiin liitetään jokaisesta mittauksesta vähintään kaksi kuvaa. Vähintään yhden kuvan tulee esittää yleistä linjaa mittauksissa. Selkeästi yleisestä linjasta poikkeavat käyrät, kuten selvät ylitykset tai muuten räikeästi poikkeavat käyrät tulee esittää raportissa. Pohdi samalla, mistä suojien kyseinen käyttäytyminen voisi johtua, etenkin jos samankaltaiset poikkeamat toistuvat tuloksissa useamman kerran.